

**Universidad Nacional del Centro de la Provincia de
Buenos Aires**

Facultad de Ingeniería

**MAGISTER EN TECNOLOGIA Y CONSTRUCCIONES DE
HORMIGON**

**“ANTECEDENTES Y METODOLOGIA DE ENSAYO
PARA EVALUAR LA REACCION ALCALI SILICE.”**

Tesista: Falcone Darío Daniel

Director: Batic Oscar Rafael†

Codirector: Irassar Edgardo Fabián

Julio de 2013

CONTENIDO

Agradecimientos, V

Resumen, VI

Abstract, VII

Objetivos generales, VIII

Objetivos específicos, VIII

Introducción, 1

Capítulo 1

**Análisis comparativo de lo métodos de ensayo para evaluar la reacción
álcali – sílice (RAS), 7**

1. Introducción, 7

2. Métodos de ensayo de carácter químico, 8

2.1. Método ASTM C 289, 8

2.2. Método danés, 9

2.3. Método de contracción química, 10

2.4. Método de la celda osmótica, 11

3. Ensayos basados en la expansión de la barra de mortero, 12

3.1. Método de la barra de mortero (ASTM C 227), 12

3.2. Método acelerado de la barra de mortero (danés), 17

3.3. Método acelerado de la barra de mortero (NBRI), 17

3.4. Método acelerado de la barra de mortero (japonés), 18

3.5. Método de autoclave para acelerar la expansión de la barra de mortero, 18

3.5.1. Método chino, 18

3.5.2. Método japonés, 18

3.5.3. Método GBRC, 19

3.5.4. Método canadiense, 19

4. Ensayos basados en prismas o testigos de hormigón, 20

4.1. Método del prisma de hormigón (ASTM C 1293), 20

4.2. Método rápido en testigos de hormigón, 22

4.2.1. Método de Scott y Duggan, 22

4.2.2. Método propuesto por Hudec y Larbi, 23

- 4.2.3. Métodos rápidos en prismas de hormigón, 24
- 4.2.3.1. Método acelerado usando prismas de hormigón, 24
- 4.2.3.2. Método acelerado en prismas de hormigón curado a 60°C, 25
- 5. Conclusiones, 25
- 6. Bibliografía, 27

Capítulo 2

Normas y reglamentos para evaluar la potencial reactividad de los agregados, 33

- 1. Introducción, 33
- 2. Descripción de los métodos, 34
 - 2.1. Método del prisma de hormigón, 34
 - 2.1.1. IRAM 1700, 34
 - 2.1.1.1. Instrumentos, 35
 - 2.1.1.2. Probetas de ensayo, 35
 - 2.1.1.3. Materiales, 35
 - 2.1.1.4. Dosificación del hormigón, 36
 - 2.1.1.5. Preparación de los prismas de hormigón, 36
 - 2.1.1.6. Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón, 37
 - 2.1.2. CSA A23-2-14A, 37
 - 2.1.2.1. Instrumentos, 38
 - 2.1.2.2. Probetas de ensayo, 38
 - 2.1.2.3. Materiales, 38
 - 2.1.2.4. Dosificación del hormigón, 38
 - 2.1.2.5. Preparación de los prismas de hormigón, 38
 - 2.1.2.6. Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón, 38
 - 2.1.3. ASTM C 1293, 39
 - 2.1.3.1. Instrumentos, 39
 - 2.1.3.2. Probetas de ensayo, 39
 - 2.1.3.3. Materiales, 39
 - 2.1.3.4. Dosificación del hormigón, 40
 - 2.1.3.5. Preparación de los prismas de hormigón, 40
 - 2.1.3.6. Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón, 40

- 2.1.4. RILEM AAR-3, 41
 - 2.1.4.1. Instrumentos, 41
 - 2.1.4.2. Probetas de ensayo, 41
 - 2.1.4.3. Materiales, 41
 - 2.1.4.4. Dosificación del hormigón, 41
 - 2.1.4.5. Preparación de los prismas de hormigón, 42
 - 2.1.4.6. Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón, 42
- 2.2. Método acelerado de la barra de mortero, 43
 - 2.2.1. IRAM 1674, 43
 - 2.2.1.1. Acondicionamiento, 43
 - 2.2.1.2. Muestreo y preparación de las probetas, 44
 - 2.2.1.3. Procedimiento, 44
 - 2.2.2. CSA A23-2-25A, 45
 - 2.2.2.1. Acondicionamiento, 45
 - 2.2.2.2. Muestreo y preparación de las probetas, 45
 - 2.2.2.3. Procedimiento, 46
 - 2.2.3. ASTM C 1260, 46
 - 2.2.3.1. Acondicionamiento, 47
 - 2.2.3.2. Muestreo y preparación de las probetas, 47
 - 2.2.3.3. Procedimiento, 47
 - 2.2.4. RILEM AAR-2, 47
 - 2.2.4.1. Acondicionamiento, 48
 - 2.2.4.2. Muestreo y preparación de las probetas, 48
 - 2.2.4.3. Procedimiento, 49
- 3. Análisis comparativo de los métodos, 49
 - 3.1. Síntesis de los métodos del prisma de hormigón, 49
 - 3.2. Síntesis de los métodos acelerados de la barra de mortero, 51
- 4. Conclusiones, 52
- 5. Bibliografía, 53

Capítulo 3

Antecedentes experimentales del LEMIT (Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica), 56

1. Introducción, 56
2. Ensayos normalizados, 57
 - 2.1. Método de la barra de mortero IRAM 1637 (ASTM C 227), 57
 - 2.2. Método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 (ASTM C 1260), 75
 - 2.3. Método del prisma de hormigón IRAM 1700 (ASTM C 1293), 85
3. Otros ensayos, 92
4. Conclusiones, 93
5. Bibliografía, 96

Capítulo 4

Experiencias realizadas con agregados de diferentes procedencias, 98

1. Introducción, 98
2. Agregados utilizados: Clasificación petrográfica, 99
3. Evaluación de los agregados con distintos métodos de ensayos, 103
 - 3.1. Método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 (ASTM C 1260), 103
 - 3.1.1. Materiales, 103
 - 3.1.2. Resultados, 103
 - 3.2. Método del prisma de hormigón IRAM 1700 (ASTM C 1293), 106
 - 3.2.1. Materiales, 106
 - 3.2.2. Resultados, 106
4. Comparación de resultados entre métodos de ensayo, 108
5. Conclusiones, 114
6. Bibliografía, 115

Capítulo 5

Consideraciones finales, 117

1. Conclusiones, 117
2. Estudios futuros, 120

Capítulo 6

Referencias bibliográficas, 121

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera recordar al Ing. Oscar Batic, a casi dos años de su fallecimiento como así también destacar la dedicación como Investigador, docente y profesional de la Tecnología del Hormigón y especialmente los estudios sobre la Reacción Álcali – Sílice.

Quiero expresar mi agradecimiento a mis directores Ing. Oscar Batic e Ing. Fabián Irassar por todo el conocimiento, colaboración y dedicación que me han brindado, en el transcurso del desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Director del LEMIT, Ing. Luis Traversa, por posibilitar la realización del Magíster en Tecnología y Construcciones de Hormigón, permitiendo de esta manera perfeccionar mi formación académica.

Quiero dedicar esta maestría a mi esposa Mariana, a mis hijos Sofía y Donato, a toda mi familia y amigos.

RESUMEN

En la última década, el volumen de hormigón utilizado en distintos tipos de estructuras, principalmente pavimentos, aumentó considerablemente por motivos técnicos y económicos. Efectivamente se han reactivado algunos yacimientos de agregados que fueron cerrados oportunamente por falta de demanda y abierto algunos nuevos para cubrir nuevas necesidades. Esto ocurre en la zona de la Provincia de Buenos Aires (Olavarría, Azul, Tandil), Comodoro Rivadavia, Viedma, Entre Ríos y Corrientes. En el LEMIT se ha estudiado el comportamiento de algunos de estos agregados frente a la RAS

El área de la temática, está incluida dentro de la durabilidad de estructuras de hormigón. Está orientada a la evaluación de los materiales componentes del mismo, en nuestro caso, los agregados finos o gruesos, evaluando la reactividad alcalina potencial de los mismos. La tesis incluye una descripción de los distintos métodos de ensayo, la recopilación de información de los resultados de expansión de muestras procedentes de distintas regiones de Argentina, desde 1965 a la fecha, obtenidos principalmente en barras de mortero y prismas de hormigón por métodos normalizados según IRAM. Además, para un grupo de agregados de diversa mineralogía y procedencia, se evalúa la reactividad alcalina potencial utilizando diferentes metodologías de ensayo que son de aplicación en la actualidad.

La tesis es un aporte a la evolución de los métodos y sus modificaciones, como así también a los cambios que se pueden realizar para una mejor interpretación de los resultados, desde el punto de vista de los límites propuestos en la normativa actual, ya sea en el valor o en el tiempo de ensayo. También se informa el estado en que se encuentran algunas obras de hormigón que se construyeron con materiales que fueron estudiados previamente y otras que no cuentan con estos antecedentes.

ABSTRACT

In the last decade, the amount of concrete employed in various types of structures, particularly pavements, was greatly increased due to technical and economical reasons. Indeed, some aggregates deposits that were closed due to lack of demand have been reactivated, and some new ones were opened to meet new needs. This occurs in the area of the Province of Buenos Aires (Olavarría, Azul, Tandil), Comodoro Rivadavia, Viedma, Entre Ríos and Corrientes. The behavior of some of these aggregates against ASR (alkali-silica reaction) had been previously studied in LEMIT.

The subject area refers to the durability of concrete structures. Its aim is the evaluation of potential alkali reactivity of coarse or fine aggregates, as component materials of concrete. This thesis includes a description of the different test methods, and data collection of expansion results in samples from several regions of Argentina, from 1965 until today, obtained mainly by applying the mortar bars and concrete prisms standard method according to IRAM. Furthermore, for a set of aggregates of different mineralogy and origin, potential alkali reactivity was evaluated employing several currently applicable test methodologies.

The thesis contributes to the evolution of methods and their modifications, as well as to the possible changes for a better interpretation of the results, from the point of view of the limits proposed by the current regulations, either about value or test time. It also contains information about the present condition of several concrete works, some of them built with previously studied materials.

OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general de la tesis es estudiar los métodos de ensayo disponibles para evaluar la potencial reactividad de los agregados.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

En particular analizar antecedentes del LEMIT desde 1965 a la actualidad, resultados de distintos métodos de ensayo y la normativa vigente para evaluar la reactividad de los agregados.

Además estudiar distintos tipos de agregados de la República Argentina con los métodos normalizados y en función de su mineralogía proponer algunas modificaciones que se pueden realizar a los métodos de ensayo para futuras actualizaciones de las normativas, principalmente agregados graníticos de la Provincia de Buenos Aires.

INTRODUCCION

Durabilidad es la capacidad que poseen los materiales, que componen una estructura, de perdurar en el tiempo manteniendo sus características iniciales. En el caso del hormigón, la principal causa de su deterioro está vinculada a la acción del medio ambiente que lo rodea (suelos, agua, temperatura, humedad relativa, iones agresivos, etc).

El Reglamento CIRSOC-201 (2005) hace referencia al concepto de vida útil en servicio de una estructura como *“El período a partir de la construcción, durante el cual deben mantenerse las condiciones de seguridad, funcionalidad y aspectos aceptables sin gastos de mantenimiento significativos”*; considerando expresamente que las especificaciones de durabilidad indicadas en el mismo, permiten obtener una vida en servicio de la estructura de 50 años [1].

Hay diversas patologías que afectan a las estructuras de hormigón armado, las principales son: ataques químicos, ataques físicos, corrosión de la armadura y reacción álcali agregado (RAA).

Entre las patologías citadas, la RAA se divide en reacción álcali carbonato (RAC) y reacción álcali sílice (RAS), siendo esta última el objeto del presente estudio. La RAS es una reacción química que se produce entre los álcalis presentes en la solución de poros del hormigón y la sílice inestable contenida en algunos agregados, en presencia de humedad periódica o permanente, que produce compuestos expansivos que fisuran el hormigón y deterioran la estructura.

En la figura 1 se presenta el modelo que esquematiza todos los procesos de degradación del hormigón, el cual incluye dos períodos: *período de iniciación (Pi)* que es el tiempo que tardan las sustancias agresivas y las reactivas en ponerse en contacto y el *período de propagación (Pp)* que es el tiempo durante el cual se producen las reacciones cuyos resultados pueden llegar a un grado de deterioro inaceptable para la seguridad, funcionalidad o estética de la estructura. Este modelo fue propuesto por Tutti para la corrosión de las armaduras.

En el caso de la RAS, el *período de iniciación* es el tiempo durante el cual los iones (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , OH^-) en la solución de poros migran o difunden hacia el agregado reactivo y se forman los primeros productos de reacción, denominado como el período de inducción de la RAS [2]. El *período de propagación* es el tiempo donde el hinchamiento del gel genera tensiones que superan la resistencia a tracción del hormigón provocando las primeras fisuras (no visibles a simple vista) y/o la aparición de geles sobre la superficie de la estructura. De esta manera se llega a la vida útil en servicio que solo requiere una mínima reparación para mejorar el aspecto estético de la estructura. El aumento de las fisuras, en tamaño (ancho y longitud) y cantidad (densidad) afecta la funcionalidad de la estructura requiriendo una mayor intervención para que la misma continúe en servicio; y por último el crecimiento de tamaño y la unificación de fisuras provocan una disminución de la capacidad portante que pueden producir el colapso de la estructura, poniendo en riesgo la vida de los usuarios, seguridad, y de esta manera se llega al final de la vida útil.

En este modelo de deterioro por RAS, cuando las estructuras de hormigón no están sometidas a un nivel adecuado de humedad presenta un período de iniciación indefinido.

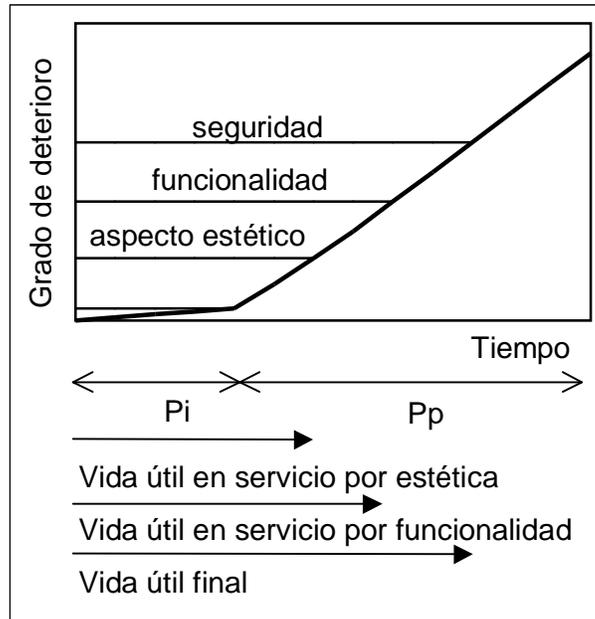


Figura 1. Esquema de Tutti adecuado a RAS.

La RAS tiene dos comportamientos diferenciados en función de la mineralogía de los agregados, definidos según la velocidad de reacción: reacción rápida o normal y reacción lenta. Los agregados que producen una reacción rápida principalmente están constituidos por sílice amorfa (como ópalo) y vidrio volcánico. Mientras que los agregados constituidos por cuarzo microcristalino, tensionado y/o deformado generan una reacción lenta [3-4].

La RAS produce daño en las estructuras de hormigón cuando se cumplen simultáneamente condiciones del grupo de materiales constituyentes, del medio ambiente y del tipo de estructura. Las condiciones citadas, hacen referencia a la definición de la RAS, pues deben existir agregados reactivos, presencia de iones alcalinos (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , OH^-) en la solución de poros aportados principalmente por el cemento, humedad elevada en forma periódica o permanente que dependerá de la ubicación de la estructura y del medio ambiente; y por último la temperatura es un factor que puede acelerar el proceso de deterioro [2].

Los primeros antecedentes de estructuras afectadas por RAS, fueron detectadas entre los años 1920 y 1930 en los Estados Unidos de América [5]. En la planta hidroeléctrica Buck, construida en 1912 en Virginia, se detectaron las primeras evidencias de RAS, expansión y fisuración, en 1922. Los resultados de ensayos realizados con los

mismos agregados utilizados en la construcción de la planta empleando un cemento de elevado contenido de álcalis mostraron grandes expansiones luego de un año a 43 °C [6]. En 1932, la presa Owyhee en Oregon se construyó con un agregado natural caracterizado como muy reactivo con el método de la barra de mortero y solamente se manifestaron evidencias de RAS, fisuración, en 2 ó 3 áreas en 1937, este deterioro progresó hasta los seis años (1943) [7]. La presa Parker, sobre el río Colorado, se terminó de construir en 1938 y a los dos años aparecieron fisuras características de la RAS de igual manera a lo diagnosticado por Stanton [8]. En Argentina, a mediados de la década de 1950, la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires solicitó al LEMIT, con posterioridad a la construcción, evaluar el deterioro progresivo del camino de hormigón a Punta Lara; estudios realizados a los agregados y al cemento confirmaron que era posible la existencia de RAS en el hormigón [9].

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran ejemplos de obras de hormigón afectadas por RAS en Argentina. El hormigón de las figuras 2 y 3 está elaborado con agregados de reacción rápida o normal y el hormigón de la figura 4 con agregados de reacción lenta.



Figura 2. Pilares de compuerta reguladora de agua. Cinco Saltos. R. Negro



Figura 3. Hormigón de la presa "El Cadillal" Tucumán.



Figura 4. Pavimento en la ciudad de Olavarría

La RAS se puede evitar si se toman los recaudos necesarios en la redacción de las especificaciones de los pliegos de construcción y que las mismas se cumplan en obra.

Para evitar la RAS es necesario que uno de los tres factores principales (agregados reactivos, álcalis y humedad) no esté presente o esté en cantidades insuficientes durante la vida en servicio [10-11]. Por lo tanto, en caso de existir algunos de estos factores, por ejemplo obras que estén en contacto con humedad elevada, habrá que evaluar los agregados frente a los álcalis antes de ser usado en la elaboración del hormigón, con el fin de eliminar uno de los factores (agregados reactivos). En el caso de que fuesen potencialmente reactivos, buscar soluciones tecnológicas para atenuar la RAS como por ejemplo disminuir el contenido de álcalis en el hormigón y/o usar adiciones minerales activas y de esta manera lograr la vida útil de diseño de la estructura. Para cumplir con este propósito existen diversos métodos de ensayo que permiten evaluar a los agregados y a los materiales cementantes. Otra tendencia nueva es analizar el conjunto de materiales (agregados-material cementante) y observar el comportamiento de dicho conjunto.

Detectar los agregados potencialmente reactivos y aplicar soluciones tecnológicas comprobadas, a través de métodos de ensayo de laboratorio, sería la manera más simple

para evitar el deterioro de las estructuras de hormigón por RAS. Los estudios previos de los agregados, a la ejecución de una obra, no solamente son de carácter técnicos, sino también de carácter económico, ya que al ser considerados potencialmente reactivos es necesario la búsqueda de una solución técnica-económica factible, ya sea analizando el material cementante y/o el conjunto de materiales.

La consecuencia más significativa de la RAS es el aumento de volumen del hormigón, que puede dejar fuera de servicio a las estructuras. De acuerdo al tipo de estructura será la consecuencia, por ejemplo en un pavimento, la expansión generada por la RAS, producirá el cerrado de las juntas de dilatación, roturas y posteriormente una superposición de las losas, con lo cual el daño entorpece al tránsito. Cuando el hormigón corresponde a una obra hidráulica, como es el caso de los pilares y compuertas de un dique se produce el bloqueo de las mismas o filtraciones en el cuerpo de las presas. Generalmente, el grado de deterioro se agrava por la coexistencia de otras agresiones que aumentan el grado de deterioro, la circulación de agua, la carbonatación, congelación y deshielo, etc.

CAPITULO 1

ANALISIS COMPARATIVO DE LOS METODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR LA REACCION ALCALI-SILICE (RAS)

1.- INTRODUCCION

El objetivo de esta recopilación bibliográfica es analizar los distintos métodos de ensayo disponibles, los resultados que se obtienen y relacionarlos con el comportamiento de obras existentes para interpretar la validez de sus resultados y aportar los estudios necesarios para las nuevas obras de hormigón.

En esta sección se presenta una breve descripción de los distintos métodos de ensayo para evaluar la RAS y el análisis crítico de los mismos. Los métodos de ensayo según sus principios metodológicos se pueden clasificar en cuatro grupos:

- Métodos basados en el análisis petrográfico de los agregados componentes del hormigón, que no se incluyen en el objeto del presente estudio.
- Métodos de carácter químico, que consisten en evaluar la sílice disuelta y la concentración de OH^- después de la exposición del agregado en una solución alcalina.
- Métodos basados en la evaluación de la expansión de barras de mortero con diferentes condiciones de curado o estacionamiento (temperatura, humedad, soluciones, etc)
- Métodos basados en la evaluación de la expansión de hormigones, a través de prismas elaborados en laboratorios o de testigos extraídos en obras.

Algunos de estos ensayos están normalizados y son de uso frecuente en la evaluación de la reactividad potencial de agregados que han sido utilizados en obras de hormigón, mientras que otros métodos son meramente experiencias de laboratorio, las

cuales pueden coincidir o no con las distintas teorías sobre el desarrollo de la expansión debido a la RAS.

Entre los ensayos normalizados que mayor difusión han tendido en distintos países se encuentra el ensayo de expansión en barras de mortero basado en la norma ASTM C227 [12] y el ensayo de expansión en prismas de hormigón basado en la norma ASTM C 1293 [13], los cuales se analizarán y compararán en forma extensa en el capítulo 2.

2.- METODOS DE ENSAYO DE CARACTER QUIMICO

Entre los métodos de ensayo clasificados como químicos se encuentran: el método ASTM C289 [14], el método danés propuesto por Chatterji [15], el método danés de contracción química [16], el método de la celda osmótica [17]. Todos estos métodos son confiables para algún tipo de agregado en particular, pero con excepción del método de la celda osmótica ninguno es aplicable universalmente. Son métodos rápidos, usados principalmente cuando no hay tiempo para realizar el método del prisma de hormigón pero con el desarrollo de los ensayos acelerados de la barra de mortero, los métodos químicos fueron perdiendo interés.

2.1.- Método ASTM C 289

Este ensayo se basa en la reacción que se produce entre una solución 1 normal de NaOH a 80°C durante 24 horas y un agregado (grueso o fino), que ha sido molido y tamizado pasante por el tamiz IRAM N° 50 y retenido en el tamiz IRAM N° 100. Pasado este tiempo se enfría la muestra y se filtra de acuerdo a lo especificado en la normativa. Se determina la sílice disuelta y la reducción de la alcalinidad. Los agregados se consideran reactivos cuando al representarlo en la figura 1 (reducción de alcalinidad – concentración de sílice disuelta) caen sobre la línea o a la derecha de la misma.

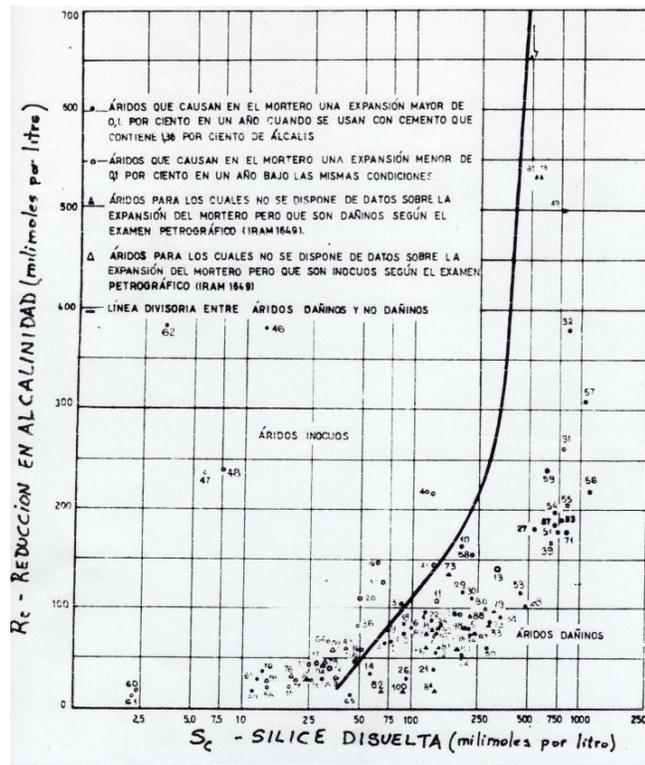


Figura 1. Gráfico adaptado de la norma IRAM 1650

2.2.- Método danés

Se trata de un ensayo simple para el estudio de la reactividad potencial de los agregados. Según Chatterji [15], el método consiste en elaborar una mezcla de CaO y el agregado a evaluar expuesta a una solución saturada de KCl mantenida a temperatura elevada (70 °C). Después de 24 horas, la suspensión es enfriada a 20°C, se filtra y se determina la concentración del ión hidroxilo [OH⁻]. El valor de [OH⁻] es comparado con el obtenido de una suspensión patrón formada por una mezcla de arena de cuarzo puro y CaO tratada de la misma manera. Una baja concentración de OH⁻ en la solución de ensayo comparada con el patrón control indica que el agregado es potencialmente reactivo. En la tabla 1 se informan resultados de distintos agregados y puede observarse que cuando aumenta la diferencia de la [OH⁻] con la muestra patrón se presume que el agregado es más reactivo. Se determina un desvío estándar en la medición de la concentración de OH⁻ de un 2%, por lo tanto puede ser usado para control de calidad de los agregados.

Tabla 1: Resultados de concentraciones OH⁻ para el método danés [15]

Muestra Arena	Reactividad	Concentración OH ⁻ (mg/l) a 70°C	Diferencia [OH ⁻] con muestra patrón
Patrón	-	597	-
1	Muy baja	563	34
2	Baja	525	73
3	Alta	460	137
4	Alta	457	140

2.3.- Método de contracción química

El método de contracción química para determinar reactividad potencial de los agregados está basado en colocar el material en tamaño arena en una solución 10 M de NaOH a 50°C y monitorear la contracción de volumen [16]. El método consiste en sumergir 25 g de cada fracción de arena (4-2; 2-1 y 1-0,3 mm) en un frasco de 50 ml con suficiente agua en ebullición. Durante 3 horas, el frasco cerrado para evitar la evaporación, se coloca en una mesa vibradora para asegurar la eliminación del aire y finalmente se deja reposar. Una vez decantado el agregado se cambia el agua por la solución de hidróxido de sodio 10 M, se ajusta a 0,2 ml y el frasco con arena y solución se coloca a 50 °C, luego de alcanzar el equilibrio térmico (aproximadamente 20 minutos) y se inician las medidas de cambio volumétrico debido a la contracción química del sistema. Se mide 3 a 5 veces hasta las 20 horas. El límite sugerido para considerar un agregado como potencialmente reactivo es de 0,4 ml de contracción por kg de arena después de 20 horas. La contracción química se compara con el análisis de sílice disuelta en la solución. La ventaja del método es que se obtienen resultados en un día siendo su dificultad la preparación de la muestra para su completa saturación. Los resultados mostraron una buena correlación con la expansión de barras de mortero utilizando el mismo agregado (arena silíceo que contiene flint) mediante el método acelerado danés de la barra de mortero TI-B51 [18].

2.4.- Método de la celda osmótica

Este método fue desarrollado por Verbeck y Gramlich en 1955, y una serie de experiencias realizadas por Schmitt y Stark [19] permitieron establecer los límites para caracterizar a los agregados como potencialmente reactivos. Esta metodología simula la interfaz que se produce entre el agregado y la pasta de cemento que lo rodea. El equipo consiste en dos cámaras cilíndricas de 50,8 mm de diámetro, separadas por una membrana de pasta de cemento de alto álcalis, $a/c = 0,55$ curado bajo agua por 28 días, y en la parte superior tiene 2 tubos capilares. Una cámara corresponde a la de reacción (agregado en estudio) y la otra a la cámara de reserva alcalina (solución NaOH) separada por una membrana de 6,35 mm de espesor (Figura 2). En la cámara de reacción se coloca 12 g del agregado en estudio en la fracción 300-150 μm (Tamices N° 50 – 100). Ambas cámaras y los tubos se llenan con una solución de NaOH 1N y se mantiene la temperatura de ensayo a 21 °C.

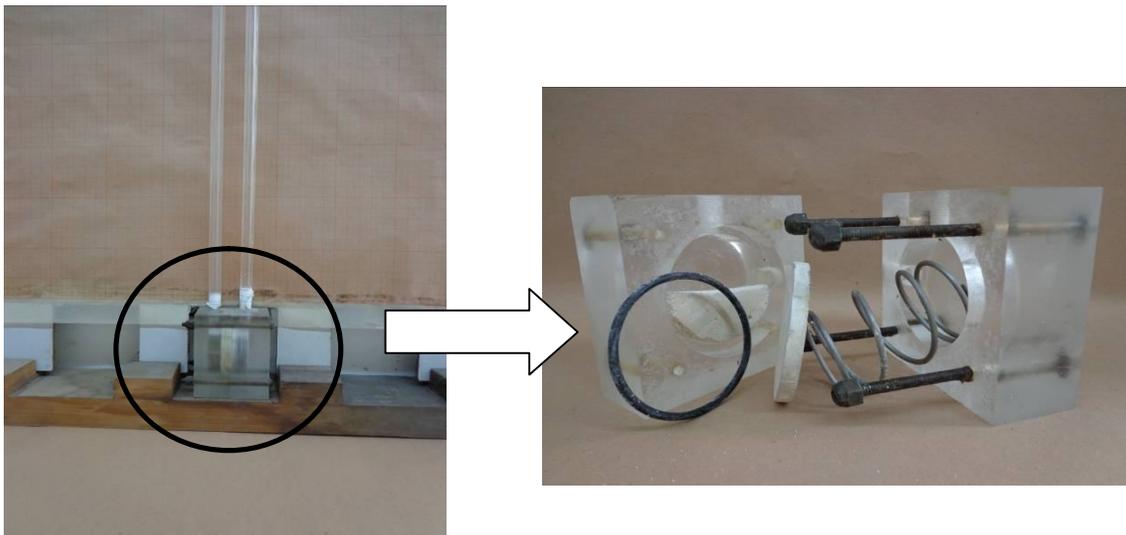


Figura 2. Equipo de la celda osmótica

Cuando se produce la reacción, comienza el pasaje de la solución de la cámara de reserva a la cámara de reacción a través de la membrana de cemento, observándose el desnivel de altura de la solución en los tubos. Dicha altura se registra diariamente durante un mes. Los resultados se grafican y se determina la pendiente que es la velocidad del

flujo en mm/día que permite caracterizar la reactividad del agregado. Este será reactivo si dicho valor supera los 1,5 a 2,0 mm/día.

Utilizando este método, Batic *et al.* [20] realizaron experiencias con arena oriental (A.O.), ópalo (ORN – ópalo de tronco de madera fósil procedente de Río Negro), tridimita (TV Valcheta) y mezclas de estos agregados. En la tabla 2 se indica los resultados obtenidos indicando que la arena oriental es un agregado no reactivo y el resto de los agregados son reactivos, lo cual coincide con los resultados obtenidos mediante otros métodos.

Tabla 2: Resultados de velocidad de flujo según el método de la celda osmótica.

Agregado	Velocidad del flujo (mm/día)
AO	0
ORN	27
50%ORN + 50%AO	10
TV	9
50%TV +50% AO	4

3.- ENSAYOS BASADOS EN LA EXPANSIÓN DE LA BARRA DE MORTERO

3.1.- Método de la barra de mortero (ASTM C227)

Este método de ensayo cubre la determinación de la susceptibilidad de una determinada combinación cemento-agregado a las reacciones expansivas que involucran iones hidroxilo asociados con los álcalis (sodio y potasio) mediante la medición del aumento (o disminución) de longitud de barras de mortero que contienen dicha combinación de materiales durante el almacenamiento bajo las condiciones prescritas de la ensayo.

El método de ensayo consiste en elaborar barras de 25,4 x 25,4 x 300 mm³ utilizando morteros en proporciones 1:2,25 y la cantidad de agua necesaria para obtener una fluidez de 110 ± 5 %. El agregado en estudio se reduce a la granulometría especificada por la norma. Luego de elaborado el mortero, se realiza la lectura de referencia de las probetas a las 24 h y las mismas se colocan en forma vertical en un contenedor con 50 mm de agua en el fondo a una temperatura de curado de 38 ± 2 °C.

Para evitar el contacto de las barras con el agua, las mismas se disponen en un soporte especial (Figura 3).



Figura 3. Equipo para ensayo ASTM C227

Desde su introducción en 1950, este método ha sido ampliamente utilizado para determinar la reactividad alcalina potencial de los agregados con cementos de bajo y alto contenido de álcalis. En la interpretación de los resultados de este ensayo, Lane [21] observó ciertas dificultades para algunas combinaciones de agregados-cemento que desarrollaron una baja expansión a la edad de 3 y 6 meses, menor a los límites propuestos por ASTM C 33, y a partir de los 6 meses hasta los 4 ó 5 años desarrollaron una expansión significativa que coincide con las acciones deletéreas obtenidas en hormigones en servicio. Otra situación conflictiva ocurre cuando se utiliza un cemento de bajo álcalis o levemente inferior al 0,60 % de álcalis y los resultados muestran expansiones significativas. La norma ASTM C227, especifica que el contenido de álcalis del cemento a utilizar debe exceder el 0,60% de $(Na_2O)_{eq} = (0,658 K_2O + Na_2O)$, o debe usarse un cemento de referencia con alta disponibilidad de álcalis. Por otro lado la especificación ASTM C33 sugiere que el contenido de álcalis sea aproximadamente 0,80%.

Las principales variables estudiadas en los ensayos realizados por Lane [21] fueron: el origen y cantidad de material reactivo; el contenido de álcalis equivalente del cemento y la efectividad de la ceniza volante para reducir la expansión. Para los distintos tipos de agregados estudiados, se utilizaron tres cementos con distintos contenidos de

álcalis (1,1; 0,8 y 0,54 %) y distintos porcentajes de reemplazo (7,5; 15 y 20%) de ceniza volante por cemento en peso. Las conclusiones de este estudio indican que para todas las combinaciones de agregados reactivos y cemento de bajo álcalis, la expansión fue inferior al límite de expansión indicado a los 6 meses por ASTM C33 (0,10 %), pero dichas combinaciones presentan un incremento rápido de la expansión hasta 1 año y luego continuando hasta los 3 años. También se observó que la incorporación de porcentajes crecientes de ceniza volante reduce la expansión. Para un reemplazo del 7,5 % la expansión es ligeramente menor a 0,10%, mientras que el reemplazo del 15 y 20 % inhiben la RAS hasta los 4 años.

Oberholster [22] resume los resultados de un programa de ensayo interlaboratorios para evaluar la reactividad potencial alcalina de diferentes combinaciones agregado-cemento. El propósito del programa fue comparar los resultados, variación de la reactividad de agregados de distintos países con el mismo cemento (alto álcalis) y comparar la reactividad del mismo agregado combinado con cementos de diferentes países. Para esta experiencia se utilizaron un agregado reactivo (caracterizado por varios métodos de ensayo) y una arena natural no reactiva, combinados con distintos cementos con cuatro contenidos de álcalis (0,62%; 0,85%; 0,82% y 1,1%) Los resultados de un laboratorio sudafricano presentaron una mayor expansión que el resto de los participantes, siendo el único que caracterizó al agregado como reactivo y observó geles en la superficie de todos los prismas. Para el resto de los laboratorios, los resultados arrojaron valores inferiores al límite de expansión. Entre los participantes del programa, los holandeses sugirieron que la elevada expansión se debió a la fisuración de los prismas debido la contracción ocurrida en las primeras edades (14 días) por la falta de humedad, lo cual facilitó el ingreso del agua y produjo mayor expansión. Por otro lado, los alemanes atribuyeron la diferencia a las distintas técnicas de preparación del mortero y los canadienses consideraron que la misma se debió a la elevada humedad en los contenedores de almacenaje. Por esta razón, la norma ASTM C227 en su título uso y significado advierte que *“Los datos que correlacionan los resultados de este ensayo con el comportamiento de combinación cemento-agregado en el hormigón en servicio, los resultados del examen petrográfico (ASTM C295) [23] , y los resultados de las pruebas de reactividad potencial de los agregados por métodos químicos (ASTM C289), sólo deben*

utilizarse como base para emitir conclusiones y recomendaciones sobre el uso de la combinación cemento y agregado en el hormigón”.

De acuerdo a investigaciones realizadas por Rogers y Hooton [24], el método ASTM C 227 puede subestimar la expansión de los agregados, dado que el sistema de almacenaje con mecha de las probetas puede causar una excesiva lixiviación de álcalis de las barras de mortero y así reducir la expansión. El uso de vidrio pyrex no es satisfactorio para calibrar las condiciones de almacenamiento dado que este contribuye con álcalis. La variación de resultados, ha llevado a que este ensayo pierda significancia decisoria y las causas de la variación de resultados se analizan más adelante.

Los factores que condicionan el desarrollo de la expansión con el método de la barra de mortero pueden hacer variar la clasificación como potencialmente reactivo de un agregado, los mismos se detallan a continuación

- Proporciones del agregado reactivo de reacción rápida o normal en el mortero: Se debe tener en cuenta el comportamiento *pessimun*, donde se logra la máxima expansión con pequeños porcentajes de agregados reactivos, típicamente entre el 2 a 10%.
- Contenido de álcalis del cemento: La proporción óptima para la máxima expansión varía con el tipo de agregado reactivo que se usa. Por ejemplo los agregados que contienen ópalo, tienen la máxima expansión para una cierta cantidad (*pessimun*) de álcalis en el cemento, de la misma manera que existe un contenido *pessimun* de ópalo en el agregado [25]. Para un agregado conteniendo ópalo, la máxima expansión se obtuvo con un cemento que contiene 0,8% de $(\text{Na}_2\text{O})_e$, mientras que para un agregado de reacción lenta, la máxima expansión se logró con un cemento con 1,2% de $(\text{Na}_2\text{O})_e$. [26].
- Tamaño de partícula del agregado: para un tipo de ópalo se obtuvo la máxima expansión (*pessimun*) para un tamaño de partícula de 0,2 mm, mientras que Diamond *et al.* [27] informan que la máxima expansión se logra para un tamaño de partícula de 0,034 mm. Para los agregados de reacción lenta, no hay información documentada, pues una característica de estos agregados es que no tienen un *pessimun*. En este ensayo las partículas se reducen al tamaño de arena.

- Temperatura de almacenaje: para una caliza silíceo reactiva, la expansión se incrementa linealmente con la temperatura desde 5 a 55°C. Otros autores [28] opinan que a elevada temperatura la expansión se reduce debido a la desecación de las barras o por los cambios en las propiedades de los productos de reacción.
- Humedad relativa (HR) en los contenedores de almacenaje: Para que se manifieste el daño por RAS en las estructuras de hormigón es necesario que la HR supere el 85%. La variación de la expansión para una HR entre 70 y 90% es lineal mientras que para una HR de 90 a 95% su variación es exponencial.
- Area de la sección transversal de las barras: se obtiene mayor expansión, cuando las barras poseen mayor sección que la tradicional de 25x25 mm². Bakker [29] reportó un incremento de la expansión cuando utilizó barras cuya sección mínima era 100x100 mm². Este comportamiento se puede atribuir a la mayor restricción que tendrán los geles de la reacción para migrar desde el interior de las barras hacia la superficie.
- Razón a/c: Debido al cambio de proporciones en la mezcla, su incremento afecta la concentración de álcalis en la solución de poros, pero también afecta las propiedades del mortero tales como porosidad, permeabilidad, módulo de elasticidad y la resistencia, que afectan la expansión de las barras. Hobbs *et al.* [30], obtuvieron que la expansión se reduce cuando la a/c es mayor que 0,5. Los resultados sugieren que la relación óptima está en el rango de 0,4 a 0,6 dependiendo de las propiedades físicas y químicas de los agregados. En este ensayo, la cantidad de agua de mezclado es la necesaria para producir un escurrimiento en la mesa de sacudidas de 105 a 120% con un contenido de cemento constante, por lo tanto puede haber variaciones de la razón a/c.
- Tipo de agregado: la mayor expansión se obtiene con sílice amorfa por ejemplo ópalo, siguiendo por algunos tipos de chert, riolitas, andesitas, etc. [31]. La expansión lenta se produce en los agregados con cuarzo tensionado que muestran menor expansión a los 6 meses pero causan deterioros en el hormigón después de los 5 a 10 años.

Grattan-Bellew [32] hace referencia sobre los criterios para evaluar la RAS de los distintos métodos de ensayo. Dentro de los ensayos tradicionales, existe el método de la barra de mortero (ASTM C 227) y el del prisma de hormigón (ASTM C 1293) siendo este último considerado satisfactorio para tal fin.

Experiencias de Oberholster [22], muestran que los mismos agregados que causan deterioro en el hormigón, pueden ser clasificados como inocuos aún con contenidos de álcalis de 1,1% según la especificación de ASTM (exp. < 0,10% a 6 meses) y deletéreos cuando se evalúa según Bureau of Reclamation donde el criterio de aceptación es una expansión menor de 0,10% a un año. El mismo agregado es clasificado como inocuo con contenidos de álcalis de 0,82%. Los resultados sugieren que el contenido de álcalis debe ser cercano al 1% y el criterio de aceptación una expansión menor que 0,1% a un año y como sugerencia un valor de 0,05% a 6 meses. No usar correctamente las especificaciones, puede ocasionar diagnósticos incorrectos, sobre la reactividad potencial de los agregados.

3.2.- Método acelerado de la barra de mortero (Danés)

El Método TI-B51 fue el primer método de ensayo acelerado. El tamaño de las barras es de 40 x 40 x 160 mm³. Después del desmolde, se realiza un curado húmedo por 28 días y se determina la lectura inicial. Luego se colocan en una solución saturada de NaCl a 50°C durante el período de ensayo. Las barras se enfrían a 20°C para realizar las lecturas a intervalos semanales. El tiempo total del ensayo es de 6 semanas. Este método no fue muy usado fuera de Dinamarca. [18]

3.3.- Método acelerado de la barra de mortero (NBRI)

Se preparan las barras de acuerdo a ASTM C227. A las 24 horas, las probetas son desmoldadas, se colocan en un recipiente con agua a 23 °C y se eleva la temperatura gradualmente hasta 80 °C. Después de 24 h, se registra la lectura inicial en 20 segundos, para prevenir el exceso de secado y el enfriamiento, luego se colocan en una solución de NaOH 1N a 80°C. La expansión de las probetas, después de 12 días inmersas en la solución, es usada para evaluar la reactividad potencial de los agregados. El criterio establecido por Davies y Oberholster [33] determina si la expansión es menor a 0,10%, el agregado es inocuo; cuando la expansión es mayor o igual a 0,10 % y menor o igual a

0,25%, el agregado es potencialmente reactivo de reacción lenta; y cuando la expansión es mayor a 0,25% el agregado es potencialmente reactivo, de reacción rápida.

3.4.- Método acelerado de la barra de mortero (Japonés)

Yasuhiko Yoshioka [34] propone un método rápido que está basado en el procedimiento de ASTM C227 hasta que las barras son desmoldadas y se registra la lectura inicial. Seguidamente, las barras se colocan en una solución de NaOH 1N a 80 °C por 24 horas, luego se enfrían a 20 °C (24 horas) y se registra la segunda lectura. Luego las probetas son almacenadas a 80 °C y 100% HR por 72 horas, se enfrían a 20°C (24 horas) y se registra la lectura final. El ensayo dura 7 días, el coeficiente de correlación entre el método acelerado y ASTM C227 es de 0,95 cuando se utilizó un agregado reactivo (andesita).

3.5.- Método de autoclave para acelerar la expansión de las barras de mortero

Se han propuesto cuatro métodos: chino, japonés, GBRC y canadiense.

3.5.1.- Método chino

El método consiste en moldear barras de mortero de 10x10x40 mm³, con una proporción de cemento/agregado de 10:1, una relación a/c de 0,30, un tamaño de partícula del agregado entre 0,15 y 0,75 mm y un cemento de alto álcalis equivalente (1,5%). Se desmoldan y se realiza un curado húmedo durante 1 día, luego se exponen a un curado a vapor a 100°C durante 4 horas, posteriormente son inmersas en una solución al 10% de KOH y sometidas en autoclave a 150°C durante 6 horas [35]. Una variación del método chino, es usar barras de 25,4 x 25,4 x 285 mm³, en este caso la expansión se reduce un 50% comparada con la expansión obtenida usando las barras más pequeñas (10 x 10 x 40 mm³). Tang Ming Shu [35] propone como límite la expansión entre 0,11 y 0,12%. Para confirmar el criterio de expansión se deberán ensayar una mayor variedad de agregados

3.5.2.- Método japonés

Se usan barras de 40 x 40 x 160 mm³, desmoldadas después de 24 horas y se colocan en autoclave bajo presión de 0,15 a 0,20 MPa durante un periodo de 4 a 5 horas. El contenido de álcalis óptimo en la mezcla es de 1,5% de (Na₂O)_{eq}, esto se logra

adicionando NaOH en el agua de mezclado. Expansiones mayores que 0,1% fueron consideradas deletéreas de acuerdo a la información obtenida por Nishibayashi *et al.* [36].

3.5.3.- Método GBRC

En 1984 Tamura [37] inició en Japón el desarrollo de un método rápido para identificar los agregados potencialmente reactivos. Esta variante utiliza barras de 40 x 40 x 160 mm³. El contenido de álcalis de la mezcla se incrementa a 2,5% de (Na₂O)_{eq} por adición de NaOH. Las barras son curadas en el molde por 24 horas y en agua por otras 24 horas, antes de colocarlas en autoclave a una presión de 0,15 MPa durante 2 horas. Se realiza la inspección visual para observar la fisuración, además se mide la velocidad del pulso ultrasónico (Ru) y el módulo de dinámico (Rd). Al analizar un agregado inocuo, en la inspección visual no se debe observar fisuración, la reducción de la velocidad del pulso ultrasónico debe ser menor que el 5% y la reducción del módulo dinámico menor que el 15%. El estudio indicó una muy buena correlación entre Ru, Rd y el estado de fisuración ($r^2 = 0,976$). Se observó que cuando $Rd < 15\%$ y $Ru < 5\%$ no hay fisuración y para $Rd > 15\%$ y $Ru > 15\%$ hay fisuración.

3.5.4.- Método canadiense

Bérubé *et al.* [38] realizaron experiencias con barras de morteros elaborados de acuerdo a ASTM C227 con $a/c = 0,5$ y un contenido de álcalis en la mezcla de 3,5% de (Na₂O)_{eq}, adicionando NaOH al agua de mezclado. Las probetas de 25 x 25 x 285 mm³, son sometidas a dos días de precurado (1 día en molde y 1 día en CH a 23 °C). Se mide la lectura inicial a 23 °C, se colocan en autoclave de acuerdo al ensayo ASTM C151 para cemento portland (0,17 MPa, aprox. 130 °C) durante 5 horas y se mide lectura final a 23 °C. El límite de expansión fue establecido en 0,15% para identificar los agregados deletéreos. El coeficiente de variación fue de 4,4%.

4.- ENSAYOS BASADOS EN PRISMAS O TESTIGOS DE HORMIGON

4.1.- Método del prisma de hormigón (ASTM C 1293)

Este método de ensayo cubre la determinación de la susceptibilidad de un agregado o de una combinación agregado-puzolana o agregado-escoria para el desarrollo de expansión debido a la reacción álcali-sílice determinada mediante la medida del cambio de longitud de prismas de hormigón curados en condiciones controladas. Cuando se prueba una combinación agregado-puzolana o agregado-escoria, los resultados se utilizan para establecer las cantidades mínimas de la puzolana o escoria necesarias para evitar la expansión perjudicial

Para medir la expansión se elaboran prismas de $75 \times 75 \times 300 \text{ mm}^3$, utilizando una mezcla que contiene un volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón de $0,70 \pm 0,2\%$, una relación a/c entre 0,42 y 0,45, un contenido de cemento de 420 Kg/m^3 y una cantidad de álcalis equivalente de $5,25 \text{ kg/m}^3$. El agregado en estudio se debe combinar con un agregado calificado como no reactivo. Luego de moldeado los prismas, se curan durante 24 h y se desmolda. Seguidamente se realiza la lectura inicial y se colocan dentro del contenedor de almacenamiento, con $20 \pm 5 \text{ mm}$ de agua desde el fondo del mismo y una base para evitar que los prismas estén en contacto con el agua, la temperatura de curado es de $38 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para este ensayo se emplea un cemento portland con un contenido de álcalis equivalente de $0,9 \pm 0,1\%$, que luego se incrementa a $5,25\%$ adicionando NaOH al agua de mezclado, para medir la susceptibilidad de los agregados silíceos reactivos a expandir en el término de un año de curado a 38°C y $100\% \text{ HR}$. Inicialmente, el contenido unitario de cemento de la mezcla era de 310 kg/m^3 , pero fue elevado a 420 kg/m^3 [33], manteniendo el límite de expansión en $0,04 \%$ a un año. Desafortunadamente, algunos agregados, tales como grauvacas (roca sedimentaria escasamente seleccionada con elevado contenido de matriz de composición variada) y arcilitas, cuando se eleva el contenido de cemento son clasificados como reactivos, de acuerdo al criterio de CSA A23. Este incremento excesivo del contenido de cemento en la mezcla lleva a clasificar algunos agregados como deletéreos cuando los mismos agregados presentan un comportamiento

satisfactorio en obras en servicio. Por ejemplo una caliza no reactiva, fue diagnosticada como potencialmente reactiva con el método Draft BS812, que contiene 700 kg/m³ de cemento, mientras que el mismo agregado fue clasificado como no reactivo por el método NBRI (expansión de 0,075%). Por lo tanto hay que determinar el diseño óptimo de las mezclas para que el ensayo del prisma de hormigón permita obtener resultados que sean comparables [32]. En general, este método es considerado como muy confiable y tomado como ensayo de referencia para todo tipo de agregados.

A continuación se indican factores que pueden modificar la clasificación como potencialmente reactivo de un agregado.

- Diseño de las mezclas, contenido de cemento que fue cambiando.
- Relación a/c: afecta la expansión, pero el autor [32] no obtuvo conclusiones.
- Temperatura y humedad relativa (HR>95%) de los contenedores de almacenaje: cuando se evaluó la expansión de agregados silíceos de reactividad lenta, es esencial almacenar a 38 °C los prismas. Grattan-Bellew [33] observó que en el método del prisma de hormigón, ocurre lo contrario al método de la barra de mortero, dado que al sacarles el revestimiento absorbente en el interior del contenedor (mecha) se produce una disminución en la expansión.
- La finura del cemento: modifica la expansión del prisma de hormigón, al aumentar la finura del cemento, la máxima expansión se puede obtener en pocos meses, ya que los álcalis entran en solución rápidamente. Se ha reportado que a mayor finura del cemento hay una mayor expansión de los prismas de hormigón [39], los mismos efectos probablemente ocurran en las barras de mortero.
- Tamaño y distribución de partículas del agregado: afecta la expansión de los prismas de hormigón, Grattan-Bellew [32] considera que se debe obtener una expansión óptima.

Como criterio para evaluar los resultados del ensayo del prisma de hormigón se puede observar fisuración en el hormigón cuando la expansión es aproximadamente 0,04%, límite especificado por CSA A23.1 apéndice B, al que se adhirieron muchos otros países como USA, Argentina, la Comunidad Europea. La Cement and Concrete Association considera deletéreos a los agregados cuando la expansión supera el límite de 0,05% a los 6 meses y además si al examinar el hormigón se confirma que la causa probable del deterioro es la RAS.

4.2.- Métodos rápidos en testigos de hormigón

4.2.1- Método de Scott y Duggan

Estos autores [40] proponen un método de ensayo que puede ser usado para clasificar mezclas de laboratorio y/o evaluar estructuras de hormigón en servicio desde 1 mes a 100 años. El ensayo se realiza sobre un mínimo de cinco testigos de 22 mm de diámetro y 65 mm de longitud. En caso de usar mezclas de laboratorio, los cilindros o cubos de hormigón serán curados de manera similar al curado de la estructura y luego se extraen los testigos cilíndricos.

Los testigos se colocan inmersos en agua a 21 °C durante 3 días, luego se secan y se colocan directamente en aire a 82 °C previamente precalentado durante 1 día, luego se los enfría por 1 hora y se los coloca por 1 día nuevamente en agua destilada, completando un ciclo de 2 días. Seguidamente, se repite el ciclo de dos días tomando las mismas precauciones anteriormente mencionadas, por lo tanto el tratamiento llega a 7 días donde se los vuelve a colocar a 82 °C por 3 días, durante este ciclo no es necesario medir. Después del ciclo final (10 días), los testigos son enfriados por 1 hora y se realiza la lectura inicial (de referencia), se colocan en agua destilada a 21 °C y se realizan lecturas periódicas cada 3 a 5 días. Se los seca suavemente antes de medir y luego de medir se los coloca inmediatamente en agua. El agua destilada no se cambia hasta terminar el ensayo. El límite propuesto de expansión es de 0,10% a 20 días.

El autor del método opina que los ciclos previos a la inmersión en agua, producen una actividad química y microfisuración a los testigos, por lo tanto el agua penetra rápidamente y acelera la reacción.

4.2.2.- Método propuesto por Hudec y Larbi

Como los métodos normalizados, C227 y CSA A23-2-14A (barra de mortero y prisma de hormigón) demandan 1 año para evaluar la reactividad potencial de los agregados, Hudec y Larbi [41] se propusieron desarrollar un método que proporcione resultados en pocas semanas y se correlacionen con los métodos normalizados.

El método consiste en moldear bloques de hormigón, que son curados adecuadamente, durante 28 días sumergidos en agua o mediante un curado acelerado durante 24 h a 80°C. Luego se extraen testigos cilíndricos de 19 ó 26 mm de diámetro por 60 a 70 mm de longitud. Los testigos extraídos de los bloques se los exponen en una solución de NaOH 1N a 80 °C o en una solución saturada de NaCl también a 80°C y se miden los cambios de longitud cada dos días durante tres semanas usando un dispositivo con doble LVDT.

De las experiencias realizadas, se observa que la relación a/c, método de curado, diámetro de las probetas y la solución reactiva tienen efectos significativos sobre los resultados de expansión. Una razón a/c menor que 0,45 permite obtener una mejor correlación con los resultados de los ensayos normalizados. La razón a/c tiene mucha importancia en los ensayos de reactividad alcalina, especialmente en probetas de tamaño pequeño. Las expansiones obtenidas cuando se utiliza una a/c = 0,45 son el doble que cuando se utiliza un hormigón con a/c = 0,55, afectando únicamente a los hormigones que contienen agregados reactivos. La diferencia puede ser atribuida a la mayor porosidad y permeabilidad de los hormigones con a/c más alta.

4.2.3- Métodos rápidos en prismas de hormigón

4.2.3.1.- Método acelerado usando prismas de hormigón

Para obtener información más confiable sobre la reactividad de los agregados gruesos, es necesario estudiar probetas de hormigón y de esta manera juzgar la posibilidad de RAS en estructuras de hormigón. Tsutomu Kanazu *et al.* [42] utilizan un curado en autoclave de la probetas de hormigón ($100 \times 100 \times 360 \text{ mm}^3$) para lograr una más rápida expansión. El procedimiento es similar al sugerido por Tang Ming Shu *et al.* [35] para las barras de mortero. Los prismas de hormigón son elaborados con una razón a/c de 0,35 y una relación cemento/agregado fino/agregado grueso de 10:1:6, utilizando un cemento portland normal con Na_2Oe de 0,67 y se adiciona NaOH al agua de mezclado para incrementar el contenido de álcalis de 0,67 a 1,10 y 1,50. La granulometría y tamaño de partículas de los agregados se informan en las tablas 3 y 4:

Tabla 3: Agregado Fino

Fraciones (mm)	Proporción (%)
5 – 2,5	15
2,5 – 1,2	15
1,2 – 0,6	25
0,6 – 0,3	25
0,3 – 0,15	15
0,15 – F	5
MF = 2,75	

Tabla 4: Agregado Grueso

Fraciones (mm)	Proporción (%)
20 – 10	50
10 - 5	50
MF = 6,5	

Después del moldeo, las probetas se curan un día a 23°C y $\text{HR} > 95\%$ e inmediatamente después del desmolde se determina la longitud inicial. Seguidamente se realiza un ciclo de curado a vapor en el cual la temperatura se eleva en 5 h hasta 90°C y se mantiene por 10 h luego desciende en 4 h hasta 23°C . A las 5 horas de finalizado el ciclo se llega al segundo día y se realiza la primera medida del cambio de deformación. Luego se realiza el curado en autoclave por 48 horas, en la cual la temperatura se eleva a 150°C en 3 h, se mantiene a temperatura máxima por 6 h y se deja enfriar naturalmente hasta las 39 h y finalmente se realiza la lectura de la longitud final. Durante el curado en

autoclave las probetas son embebidas en una solución al 10% de KOH. El procedimiento total es de 4 días. El criterio para juzgar a un agregado reactivo es que la expansión supere el 0,10% después del curado en autoclave.

Para el contenido de álcalis de 0,67% no hubo diferencias entre la expansión obtenida después del curado a vapor y el curado en autoclave (2 y 4 días respectivamente). Pero, para 1,1% de álcalis equivalente la diferencia fue suficientemente significativa como para juzgar la reactividad de los agregados mientras que para un contenido de 1,5% la diferencia fue mayor.

4.2.3.2.- Método acelerado en prismas hormigón curados a 60°C

Bolotte [43] realizó experiencias interlaboratorios para evaluar la RAS en condiciones aceleradas (60°C y 100% HR) sobre probetas de hormigón de 70 x 70 x 280 mm³. Se usaron cementos con distintos contenidos de álcalis equivalente y un contenido unitario de 400 kg/m³. Las experiencias se realizaron con tres agregados potencialmente reactivos y tres no reactivos. Se realizaron mezclas con distintas combinaciones de agregados y cemento.

Las probetas se mantienen por 24 h a 20°C y HR mayor que 90 %. Luego se colocan 30 minutos bajo agua a 20 °C y se realiza la lectura inicial (L0) y se colocan en un contenedor con 35 mm de agua en el fondo y todo en una cámara a 60 °C y 100% HR. Cada 2 semanas se realizan lecturas de longitudes de las barras de hormigón, previamente enfriadas a 20°C y 100% HR durante 24 h. Se colocan nuevamente en la cámara y se realizan lecturas periódicas. Al comparar los resultados con el método del prisma de hormigón curados a 38°C y 100% HR se obtiene una buena correlación y la siguiente relación entre las expansiones, para valores de 0,04% a 8 meses a 38 °C, con valores de 0,024% para 60°C a 2 meses.

5.- CONCLUSIONES

La búsqueda bibliográfica realizada, estuvo orientada al análisis de métodos de ensayos para evaluar la potencial reactividad de los agregados y analizar los resultados

obtenidos por diferentes investigadores. En función de la misma se arriban a las siguientes consideraciones:

1.- Se observa que algunos ensayos dan mejores respuestas vinculados al origen mineralógico y/o cinética de reacción (rápida o lenta).

2.- De la lectura e investigaciones realizadas se desprende la necesidad de realizar experiencias con métodos acelerados para disminuir los tiempos de ensayos, pues son muy prolongados con los métodos normalizados de la barra de mortero y el del prisma de hormigón.

3.- Todos los métodos experimentados por los distintos autores, obtienen una buena correlación con el método de la barra de mortero según ASTM C 227, a pesar que en la actualidad no es un método muy utilizado por varios inconvenientes, principalmente, la lixiviación de álcalis.

4.- El método acelerado más confiable para evaluar la reactividad potencial de los agregados, es el normalizado según ASTM C 1260, no obstante tiene falencias para detectar agregados de reacción lenta.

5.- El método acelerado del prismas de hormigón a 60°C da buena correlación con los métodos con curado normalizado (38°C y 95% HR).

6.- Diferentes autores proponen variantes a los ensayos, ya sea modificando el tenor de álcalis incorporado en morteros u hormigones, el tipo de álcalis utilizado en las soluciones de inmersión, temperatura de estacionamiento, tiempo de ensayo como así también los límites de expansión.

Se observa una gran inquietud en los autores consultados sobre la necesidad de continuar la aplicación o desarrollo de los ensayos acelerados sobre agregados reactivos con diferentes mineralogías.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Reglamento CIRSOC 201-2005. Presidencia de la Nación. Secretaría de Obras Públicas. “Reglamento argentino de estructuras de hormigón”, 2005
- 2.- “Durabilidad del hormigón estructural”. Editado por Irassar Edgardo, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, p 157, 2001.
- 3- Ponce M. y Batic O. “Mecanismo y evolución de la RAS en hormigones con agregados de reacción rápida y lenta”. Revista Hormigón, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, N° 41, p 39, 2005.
- 4.- Ponce M. and Batic O. “Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate”. Cement Concrete Research, Vol 36, N° 6, p 1148, 2006.
- 5.- Stanton, T. E. “Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate”. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 107, p 54, 1942.
- 6.- Kammer, H. A. and Carlson, R. W. “Investigation of causes of delayed expansion of concrete in buck hydroelectric plant”. Journal of the American Concrete Institute, Vol 37, p 665, June 1941.
- 7.- Blanks, R. F. and Meissner, H. S. “Deterioration of concrete dams due to alkali-aggregate reaction”. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 71, p 3, January 1945.
- 8.- Meissner, H. S. “Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker dam”. Journal of the American Concrete Institute, Vol 37, p 549, April 1941.

9.- Fava, A. S. C., Manuele, R. J., Colina, J. F. y Cortelezzi, C. R. “Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento pórtland”. Revista Técnica LEMIT Serie II N° 85, 1961.

10.- Falcone D., Batic, O. y Sota, J. “La humedad es necesaria para la RAS”. XVI Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Editado por Sota J., Mendoza, p 241, 2006.

11.- Batic O., Falcone, D. y Sota, J. “Influencia del contenido de álcalis en hormigones con agregados graníticos y basálticos”. XVI Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Editado por Sota J., Mendoza, p 249, 2006.

12.- ASTM C227 – 03. Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar – bar method)., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 152, 2008.

13.- ASTM C 1293 – 08a. Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 682, 2008.

14.- ASTM C289 – 07. Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method)., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 179, 2008.

15.- Chatterji, S. “A simple chemical test method for the detection of alkali-silica reactivity of aggregates.”, Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 295, 1989.

16.- Knudsen, T. “A continuous, quick chemical method for the characterization of the alkali-silica reactivity of aggregates.”, Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 289, 1986.

- 17.- Stark, D. "Osmotic cell test to identify potential for alkali-aggregate reactivity". Proceeding of the 6th International Conference on Alkalis in Concrete, Ed by Idorn, G. M. and Rostam, S., Copenhagen, p 351, 1983.
- 18.- Chatterji, S. "An accelerated method for the detection of alkali-aggregate reactivities of aggregate". Cement and Concrete Research, Vol 8, p 647, 1978.
- 19.- Schmitt, J. W. and Stark, D. C. "Recent progress in development of the osmotic cell to determine potential for alkali-silica reactivity of aggregates.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 423, 1989.
- 20.- Batic O., Sota, J. y Franks, L. "Experiencias realizadas para identificar agregados reactivos con el método de la celda osmótica". VIII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba, p 11, 1987.
- 21.- Stephen Lane, D. "Long-term mortar-bar expansion tests for potential alkali-aggregate reactivity.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 336, 1986.
- 22.- Oberholster, R. E. "Results of an international inter-laboratory test program to determine the potential alkali reactivity of aggregates by the ASTM C227 mortar prism method.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 368, 1986.
- 23.- ASTM C295 – 03. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 199, 2008.
- 24.- Rogers, C. A. and Hooton, R. D. "Leaching of alkalies in alkali-aggregate reaction testing.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 327, 1989.

25.- Colina, F., Wainsztein, M. y Batic, O. "Durabilidad de hormigones de cemento portland.", Revista Ingeniería del Centro de Ingenieros de la Pcia. de Buenos Aires N° 57, p128, 1967.

26.- Hobbs M. "Influence of mix proportions and cement alkali content upon expansion due to the alkali-silica reaction". Technical Report 534, Cement and Concrete Association , UK, p. 31, 1980.

27.- Diamond, S. and Thaulow, N. "A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate". Cement and Concrete Research, Vol 4, p 591, 1974.

28.- Vivian, H. E. "Some effects of temperature on mortar expansion". Australian Journal of Applied Science, Vol 2, p 114, 1951.

29.- Bakker, R. F. M. "The influence of test specimen dimensions on the expansion of alkali reactive aggregate in concrete". Proceeding of the 6th International Conference on Alkalis in Concrete, Ed by Idorn, G. M. and Rostam, S., Copenhagen, p 369, 1983.

30.- Hoobs, D. W. and Gutteridge, W. A. "Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction". Magazine of Concrete Research, 31, p 235, 1979.

31.- McConnell, D., Melenz, R., Holland, W. and Kenneth, T. "Cement-aggregate reaction in concrete". Journal of American Concrete Institute, Vol 19, p 93, 1947.

32.- Grattan-Bellew, P. E. "Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 279, 1989.

33.- Davies, G. and Oberholster, R. E. "An interlaboratory test programme on the NBRI accelerated test to determine the alkali reactivity of aggregates". National Building Research Institute, Special Report CSIRO, Petroria, South Africa, p 16, 1987.

- 34.- Yoshioka, Y., Kasami, H., Ohno, S. and Shinozaki, Y. "Study on a rapid test method for evaluating the reactivity of aggregate.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 314, 1986.
- 35.- Tang, M., Han, S. and Zhen, S. "A rapid method for identification of alkali reactivity of aggregate". Cement and Concrete Research, Vol 13, p 417, 1983.
- 36.- Nishibayashi, S., Yamura, K. and Matsushita, H. "A rapid method of determining the alkali-aggregate reaction in concrete by autoclave.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 299, 1986.
- 37.- Tamura, H. "A test method on rapid identification of alkali reactivity aggregate (GBRC Rapid Method).", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 304, 1986.
- 38.- Bérubé M. A., Fournier, B., Dupont, N., Mongeau, P. and Frenette, J. "A simple autoclave mortar bar method for assessing potential alkali-aggregate reactivity in concrete.", Proceeding of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ed by The Concrete Society, London, p 81, 1992.
- 39.- Krell, J. "Influence of mix design on alkali-silica reaction in concrete". Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 441, 1986.
- 40.- Scott, J. F. and Duggan, C. R. "Potential new test for alkali-aggregate reactivity.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 319, 1986.
- 41.- Hudec, P. P. and Larbi J. A. "Rapid methods of predicting alkali reactivity.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 313, 1989.

42.- Kanazu, T., Ohnuma, H., Nakano, T. and Ishida, H. "Study on the rapid estimation method of alkali aggregate reaction using concrete specimens." Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 375, 1989.

43.- Bollotte B. "Development of an accelerated performance test on concrete for evaluating its resistance to AAR.", Proceeding of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ed by The Concrete Society, London, p 110, 1992.

CAPITULO 2

NORMAS Y REGLAMENTOS PARA EVALUAR LA POTENCIAL REACTIVIDAD DE LOS AGREGADOS

1.- INTRODUCCION

En Argentina existen varios métodos de ensayos normalizados para evaluar la reactividad potencial de los agregados, algunos no están en uso, como el método químico (IRAM 1650) y el de la barra de mortero (IRAM 1637) y otros como los que se detallan más adelante que son los más usados incluyendo el examen petrográfico (IRAM 1649). La secuencia de ensayos sugerida por el CIRSOC 201 (2002) [1] es la siguiente: tener en cuenta si existen obras con más de 15 años (agregados de reacción rápida o normal) y 35 años (agregados de reacción lenta) [2] en servicio que no evidencien expansiones o daños asociado con la RAS con ciertas condiciones que deben cumplir, conjunto de materiales similares, igual tipología estructural, misma zona de emplazamiento, tipo de exposición similar. En este caso se considera al agregado como no reactivo. En caso de no existir estos antecedentes se debe proceder a realizar el examen petrográfico, luego el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) y como opcional o para confirmar, el método del prisma de hormigón (IRAM 1700).

En este capítulo, se estudian las diferencias entre dos tipos de ensayos, para evaluar la reactividad potencial de los agregados, uno el método del prisma de hormigón, otro, el método acelerado de la barra de mortero. Ambos métodos permiten evaluar los agregados, previo al uso en obra; con el fin de tomar precauciones durante la construcción para evitar que se deteriore antes de lo previsto.

El método del prisma de hormigón está indicado en las normativas IRAM 1700 (1997), ASTM C 1293 (2001), RILEM AAR-3 (2000) y CSA A23-2-14A (2000) utilizados en Argentina, USA, Europa y Canadá, respectivamente.

El método acelerado de la barra de mortero por las normativas IRAM 1674 (1997), ASTM C 1260 (2001), RILEM AAR-2 (2000) y CSA A23-2-25A (2000) correspondiente a los mismos países citados.

Además, se analizarán los factores que afectan los resultados de los ensayos de barras de mortero y de prismas de hormigón, y los límites máximos de expansión recomendados. A continuación se realiza una breve descripción de cada norma analizada, se destacan las semejanzas y diferencias, se las sintetiza en cuadros y luego se hacen consideraciones finales sobre el tema.

2.- DESCRIPCION DE LOS METODOS

Los métodos de ensayo a estudiar son exclusivos de laboratorio, hay que tener precaución en el seguimiento de los pasos establecidos por la normativa, por esta razón el laboratorio y los operarios deben estar calificados para tal fin. De esta manera al realizar una comparación, permite establecer las características fundamentales de los métodos que son esenciales para su correcta ejecución. Una vez estudiado con detalle cada método se transmite, en forma sintética y destacada, al operario la metodología.

A continuación se establecen de cada método las pautas antes mencionadas

2.1.- Método del prisma de hormigón

2.1.1.- IRAM 1700

Este método es empleado para determinar la reactividad potencial de los agregados gruesos o finos que constituyen el hormigón. Consiste en medir los cambios de longitud debido a la reacción álcali agregado (RAA), en condiciones de temperatura y humedad elevadas.

2.1.1.1.- Instrumentos

- *Moldes*: Deben tener las siguientes medidas 75x75x275 mm o de 75x75x405 mm.
- *Pernos (puntos de referencias)*: Serán de acero inoxidable con un diámetro de 6 ± 1 mm y de 25 mm de largo, con los extremos maquinados y colocados en el centro de la probeta.
- *Comparador de longitudes*: Tendrá una variación total del recorrido de 7,5 mm y la menor división será de 0,0025 mm. Se usa una barra de referencia de INVAR., recubierta en la parte central por una película de 3 mm de espesor para evitar cambios de temperatura durante el uso.
- *Contenedores para almacenamiento*: Deben ser de material plástico de 25 a 30 litros, con tapa hermética para asegurar una humedad de saturación y un espesor menor a 6 mm, las medidas serán de 290 ± 10 mm de diámetro interior y de 420 ± 10 mm de altura. En el fondo del recipiente lleva un bastidor perforado para el apoyo de las probetas separado del fondo a 35 ± 5 mm con agua hasta 20 ± 5 mm. Se coloca una mecha de papel secante en las paredes del contenedor y en la tapa. Se pueden utilizar contenedores alternativos, pero deben ser calibrados con contenedores normalizados y agregados reactivos, la diferencia de expansión al año debe ser menor al 10%.
- *Cámara o local de almacenamiento*: Debe ser un espacio con mínima pérdida de calor. La variación de temperatura entre los 250 mm del tope y el fondo no debe diferir en más de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura de la cámara es de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

2.1.1.2.- Probetas de ensayo

Se realizan tres prismas por ensayo y es útil confeccionar una cuarta probeta para el examen petrográfico.

2.1.1.3.- Materiales

- *Cemento*: Debe ser CPN con un contenido de álcalis equivalente de $0,9 \pm 0,1\%$. Se debe adicionar NaOH al agua de mezclado hasta alcanzar 1,25% del peso de cemento. El contenido de álcalis se determina a través de un análisis químico o certificado por el fabricante.

- *Agregados:*
 - Para determinar la reactividad del agregado grueso, se usa un agregado fino no reactivo y esto se comprueba mediante la expansión con el método IRAM 1674 que debe ser menor que el 0,10% a los 16 días o de 0,015% al año con el método IRAM 1700. El agregado fino debe tener un módulo de finura de $2,7 \pm 0,2$.
El agregado grueso está compuesto en partes iguales por las siguientes fracciones, 20-14 mm, 14-10 mm y 10-5 mm. Se deben descartar las medidas mayores que 20 mm y las menores que 5 mm.
 - Para determinar la reactividad del agregado fino, se utiliza un agregado grueso no reactivo, comprobando de la misma manera que para el agregado fino. El agregado fino es ensayado con la granulometría de origen.

2.1.1.4.- Dosificación del hormigón

La dosificación del hormigón está compuesta por 420 ± 10 kg/m³ de cemento, una relación entre el agregado grueso y el fino de 60:40 en masa. Si el agregado grueso es de alta o de baja densidad se utiliza un volumen de $70 \pm 2\%$ por volumen de hormigón. La razón a/c puede variar entre 0,42 y 0,45, para obtener las condiciones de trabajabilidad necesaria y permitir una compactación adecuada. No se debe incorporar otra adición que no sea el NaOH.

2.1.1.5.- Preparación de los prismas de hormigón

- *Mezclado:* Mecánico, empleando un volumen de hormigón para obtener una mezcla homogénea.
- *Moldeo de los prismas:* Los prismas se moldean en dos capas compactando con una varilla de 10 mm de diámetro; se realiza un golpe de varilla por cada 7 cm² (30 golpes de varilla). Se deben tomar precauciones para no dejar vacíos, principalmente en la zona de los pernos de referencia, luego se elimina el hormigón en exceso y alisa la superficie con una llana. Cubrir los prismas con una lámina de polietileno y colocar en cámara húmeda a 23 ± 2 °C y 100% de humedad relativa.

2.1.1.6.- Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón

- *Desmolde:* Las probetas deben ser desmoldadas a las 24 ± 4 horas de elaboración y la temperatura de la sala se mantiene a 23 ± 2 °C.
- *Almacenamiento y medición inicial:* Se procede a envolver los prismas con una tela de algodón saturada con agua, luego se inserta en un tubo de polietileno de 100 μ m y 180 mm de ancho ajustado mediante banditas elásticas. La tela debe tener un peso de 250 ± 50 g/m² y 10 mm mayor que el largo de la probeta y 640 mm de largo, para poder envolver las cuatro caras del prisma en dos capas. Luego individualmente se colocan en bolsas de nylon de 100 μ m de espesor, un ancho de 210 mm y un largo de 500 mm y se le adiciona 5 ml de agua, se atan para evitar pérdida de humedad y se colocan a 23 ± 2 °C hasta la lectura inicial (Li). A las 24 ± 2 horas del desmolde se determina la lectura efectiva (Le) al 1 mm, con una regla, se mide la probeta y se descuenta la longitud de los pernos.
- *Almacenamiento y mediciones subsiguientes:* Después de obtener la Le se realiza la lectura inicial Li con el comparador, luego las probetas vuelven a las bolsas de nylon agregando 5 ml de agua, se cierra y se colocan en el contenedor y estos en la cámara de almacenamiento a 38 ± 2 °C, el contenedor no debe estar en contacto con las paredes ni con el piso de la cámara de almacenamiento para garantizar la circulación del aire.

Las lecturas siguientes se realizan a las 1, 2, 4, 8, 13, 18, 39 y 52 semanas, y si es necesario se continuarán cada 6 meses. Antes de las lecturas, los contenedores pasan de 38 ± 2 °C a 23 ± 2 °C durante 16 ± 4 horas. Al finalizar el ensayo se debe realizar un examen visual de la superficie para observar la existencia de geles, fisuras, manchas, etc. Además, se debe completar con examen petrográfico del interior de las probetas. Se recomienda no realizar este examen antes de los 6 meses.

2.1.2.- CSA A23-2-14A

Este ensayo evalúa la reacción álcali agregado (RAS-RAC) en condiciones de humedad y temperatura elevada. Es aplicable a agregados finos y gruesos. Si es posible se deben correlacionar datos de resultados con observaciones de hormigones en servicio

y examen petrográfico. El contenido de álcalis de $5,25 \text{ kg/m}^3$ se estableció por trabajos realizados por investigadores canadienses, debido a que en el mercado hay cementos que poseen un elevado contenido de álcalis (1,25%) y al utilizar un contenido unitario de cemento en el hormigón de 420 kg/m^3 se llega a estos valores [3].

2.1.2.1.- Instrumentos

- *Moldes y pernos:* Iguales que en la norma IRAM 1700.
- *Comparador de longitudes:* Tiene un dispositivo para compensar el peso de la probeta. El rango total es de 8 mm y está graduado al 0,002 mm. La barra de referencia es igual a la indicada en la norma IRAM 1700.
- *Contenedores para almacenamiento:* Similares a la norma IRAM 1700.
- *Cámara o local de almacenamiento:* Igual a la norma IRAM 1700.

2.1.2.2 Probetas de ensayo

Igual a la Norma IRAM 1700.

2.1.2.3.- Materiales

- *Cemento:* Portland de uso general Tipo 10 especificado por CSA, el resto de las características igual a norma IRAM 1700.
- *Agregados:* Igual que norma IRAM 1700, excepto que la granulometría del agregado fino debe ser la indicada en la norma CSA A23-1.

2.1.2.4.- Dosificación del hormigón

Igual que la norma IRAM 1700.

2.1.2.5.- Preparación de los prismas de hormigón

- *Mezclado:* Mecánico, con una secuencia de 3 minutos, se para 3 minutos y 2 minutos de mezclado final.
- *Moldeo de los prismas:* Igual a norma IRAM 1700.

2.1.2.6.- Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón

- *Desmolde:* Igual a norma IRAM 1700.

- *Almacenamiento y medición inicial:* Inmediatamente después del desmolde cubrir con una tela húmeda las probetas para evitar el secado. A las 4 horas del desmolde se realiza la lectura inicial.
- *Almacenamiento y lecturas subsiguientes:* Similar a la norma IRAM 1700. Los prismas se colocan en el contenedor y éste en la cámara de curado (38 °C) sin estar en contacto con el piso y las paredes, que tendrán una adecuada circulación de aire.

Las lecturas se realizan a 1, 2, 4, 8, 13, 26, 39 y 52 semanas y luego cada 6 meses. Los cambios de lecturas se expresan al 0,001% más próximo.

2.1.3.- ASTM C 1293

Se utiliza para determinar la reactividad de agregados gruesos y finos. Para ello se determina el cambio de longitud en prismas de hormigón. El contenido de álcalis es de 5,25 kg/m³.

2.1.3.1.- Instrumentos

- *Moldes:* Tienen una dimensión de 75±0,7 mm de lado y 250 mm de longitud efectiva.
- *Pernos:* De acero inoxidable de 22,5 mm de longitud y 6 mm de diámetro.
- *Comparador de longitudes:* Similar a la norma IRAM 1700, excepto que la menor división es de 0,002 mm y el recorrido de 8 mm.
- *Contenedores para almacenamiento:* Similar a la norma IRAM 1700.
- *Cámara o local de almacenamiento:* Igual que la norma IRAM 1700.

2.1.3.2.- Probetas de ensayo

Igual a la norma IRAM 1700.

2.1.3.3.- Materiales

- *Cemento:* Se utiliza Tipo I según ASTM C150, el resto de las características igual a IRAM 1700.

- **Agregados:** Para determinar la reactividad del agregado grueso, se debe utilizar un agregado fino no reactivo, donde la expansión a los 16 días debe ser menor que 0,1% con el método acelerado ASTM C 1260. El módulo de finura del agregado fino debe ser de $2,7 \pm 0,2$. Para determinar la reactividad del agregado fino, se procede de la misma manera con el agregado grueso no reactivo. Las fracciones del agregado grueso se colocan en partes iguales con las siguientes dimensiones, 19mm a 12,5 mm, 12,5 mm a 9,5 mm y 9,5 mm a 4,75 mm.

2.1.3.4.- Dosificación del hormigón

El contenido de cemento es de 420 ± 10 kg/m³. El volumen de agregados por unidad de volumen de hormigón es de $0,70 \pm 0,2\%$. La relación a/c igual que IRAM 1700. No se usará otra adición.

2.1.3.5.- Preparación de los prismas de hormigón

- **Mezclado:** Puede ser manual hasta 7 litros o mecánica.
- **Moldeo de los prismas:** Se llenan en dos capas y la compactación puede ser por varilleo o por vibración, de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM C192.

2.1.3.6.- Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón

- **Desmolde:** Las probetas se desmoldan a $23,5 \pm 0,5$ horas desde la elaboración. Con iguales condiciones de curado que la norma IRAM 1700.
- **Almacenamiento y medición inicial:** La lectura inicial se realiza a $23,5 \pm 0,$ horas del desmolde, luego se colocan las probetas a $38 \pm 2^\circ\text{C}$.
- **Almacenamiento y lecturas subsiguientes:** Las probetas no estarán en contacto con el agua dentro del contenedor de almacenaje y éste no estará en contacto con el piso y las paredes de la sala a $38 \pm 2^\circ\text{C}$. Las lecturas se realizan a 7, 28, 56 días, 3, 6, 9 y 12 meses, si es necesario cada 6 meses. Los contenedores se sacan de la cámara de $38 \pm 2^\circ\text{C}$, 16 ± 4 horas antes igual que la norma IRAM 1700 y se colocan en cámara húmeda.

2.1.4.- RILEM AAR-3

Evalúa la medida de la expansión de prismas de hormigón producida por la RAS, almacenados en un medio en el cual se acelera la reacción. Nivel de álcalis de 5.5 kg/m^3 . Evalúa el efecto pessimum.

2.1.4.1.- Instrumentos

- *Moldes*: De acero, de 250 ± 50 mm de longitud y 75 ± 5 mm de sección. Se pueden usar moldes de $400 \times 100 \times 100$ mm (reconsiderar el límite de expansión).
- *Pernos*: Igual que norma IRAM 1700.
- *Comparador de longitudes*: La graduación del comparador de longitudes no debe ser mayor que 0,002 mm. La barra de referencia igual que IRAM 1700.
- *Contenedores para almacenamiento*: Similares a norma IRAM 1700, en cuanto a las características, pero la capacidad es para una sola probeta.
- *Cámara o local de almacenamiento*: Igual norma IRAM 1700.

2.1.4.2.- Probetas de ensayo

Igual norma IRAM 1700.

2.1.4.3.- Materiales

- *Cemento*: Igual norma IRAM 1700 con un contenido de álcalis equivalente entre 0,9 y 1,2%.
- *Agregados*: Se utiliza para agregados en combinación con grueso reactivo y fino no reactivo y viceversa. Los agregados gruesos y finos se consideran no reactivos cuando la expansión con el método acelerado de la barra de mortero AAR-2 es menor a 0,05 % a los 16 días.

Las fracciones de los agregados será una combinación en masa de 30% agregado fino (4-0 mm), 30% de la fracción 10-4 mm y 40% de la fracción 20-10 mm.

2.1.4.4.- Dosificación del hormigón

La dosificación en volumen debe estar constituida por el 14% de cemento, 20% de agua libre, 46% de agregado grueso y 20% de agregado fino y en el caso de

utilizar combinación de agregados gruesos y finos, la fracción total de agregados es del 66% .

2.1.4.5.- Preparación de los prismas de hormigón

- *Mezclado:* Igual norma IRAM 1700.
- *Moldeo de los prismas:* La habitación de moldeo y medida se debe mantener a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad no menor que $65\pm 5\%$. Se adiciona NaOH al agua de mezclado, se realizan 3 prismas por pastón y se compacta en dos capas de igual profundidad usando vibración. Se realiza un curado durante $24\pm 0,5$ horas en condiciones de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y más del 90% de humedad.

2.1.4.6.- Desmolde, almacenamiento y medición de los prismas de hormigón

- *Desmolde:* Las probetas se desmoldan a las $24\pm 0,5$ horas.
- *Almacenamiento y medición inicial:* Similar a norma IRAM 1700. La tela para envolver los prismas debe ser de 240 ± 30 g/m². A las 24 horas del desmolde se realiza la lectura inicial con una regla metálica al 1 mm, se pesan al ± 5 gramos y se realiza la lectura utilizando el comparador de longitudes con la barra de INVAR. La temperatura de esta operación y de las siguientes se debe realizar a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- *Almacenamiento y mediciones subsiguientes:* Luego se coloca el prisma envuelto dentro de la bolsa y se agrega 5 ml de agua destilada, posteriormente se almacena el contenedor a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta la lectura a 7 días (lectura inicial de referencia), luego se coloca el contenedor en la habitación de $38\pm 2^{\circ}\text{C}$; 24 horas antes de cada lectura se sacan los contenedores y se colocan a $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Las lecturas se realizan a 2, 4, 13, 26 y 52 semanas después del mezclado. Para algunos agregados de reacción lenta, pueden no existir expansiones deletéreas a 52 semanas, por lo tanto dependiendo de la experiencia local, las medidas deben extenderse. De acuerdo a experiencias realizadas en el LEMIT con agregados graníticos, al término de un año la expansión fue inferior al límite (0,033%) y al año y medio lo superó (0,050%). Luego de la lectura final los prismas serán examinados verificando la presencia de fisuras, geles, etc.

2.2.- Método acelerado de la barra de mortero

2.2.1.- IRAM 1674

El método está indicado para evaluar agregados de reacción lenta. No se aconseja usar para evaluar combinaciones de agregados con materiales cementicios. Se destaca que no son representativas las condiciones del ensayo con la estructura en servicio. Cuando las expansiones son excesivas hay que obtener información adicional a partir de estudios petrográficos. El objetivo es la detección de la RAS en 16 días en barras de mortero, basado en el método NBRI. Experiencias realizadas en el LEMIT, con agregados graníticos de la provincia de Buenos Aires, se han obtenido valores de expansión de 0,08%, inferior al límite, pero al verificar con el método del prisma de hormigón son calificados como reactivos. [4-5]

- *Moldes:* Deben ser de acero de $25\pm 0,8$ mm de sección y 250 ± 2 mm de longitud entre los extremos interiores de los pernos.
- *Pernos:* Estos serán de acero inoxidable de $6\pm 0,5$ mm de diámetro y 20 ± 1 mm de longitud. Se deben introducir 16 ± 1 mm dentro de la probeta.
- *Comparador de longitudes:* Debe tener una carrera de 7,5 mm, con una barra de referencia de INVAR., con una longitud total de $295\pm 1,5$ mm con los extremos maquinados, la parte central debe estar cubierta por tubo de caucho de 3 mm de espesor y 100 mm de longitud.
- *Solución de hidróxido de sodio:* Debe ser $1\pm 0,01N$ para inmersión de las probetas se obtiene disolviendo con 40 g de NaOH en 900 ml de agua destilada y se completa a 1 litro. El volumen de solución a utilizar es de $4\pm 0,5$ por volumen de barra de mortero, una barra tiene 184 ml.

2.2.1.1.- Acondicionamiento

La temperatura de la sala de moldeo y los materiales deben estar entre 20 y 27°C con HR mayor al 50%, la cámara húmeda debe cumplir con $23\pm 2^\circ C$ y HR mayor al 95%. El agua de mezclado a $22\pm 2^\circ C$. La temperatura del baño debe ser $80\pm 2^\circ C$.

2.2.1.2.- Muestreo y preparación de las probetas

- **Agregados:**
 - *Agregado fino*, la granulometría debe cumplir los siguientes requisitos: 10% del material entre 4,75 – 2,36 mm, 25% entre las fracciones 2,36 – 1,18 mm, 1,18 mm – 600 μm y 600 – 300 μm y un 15% entre 300 – 150 μm en peso. Si no alcanza el material para obtener dichas cantidades se debe triturar hasta obtener las cantidades requeridas. Si no hay más muestras para triturar se completan las fracciones faltantes con el primer tamaño del cual se dispone con material suficiente, esto debe ser aclarado en el informe.
 - *Agregados gruesos* se debe triturar la muestra hasta que la totalidad pase por el tamiz de 4,75 mm. Si la muestra extraída de cantera es gruesa y fina, de la misma procedencia, se ensaya la fina, salvo que la fracción gruesa tenga distinta composición petrográfica.
- *Cemento*: Debe cumplir con la Norma IRAM 50000, previo al uso se debe tamizar por el tamiz de 600 μm .
- *Preparación de las probetas*: Se moldean tres probetas por pastón constituido por 1 parte, en peso, de cemento y 2,25 partes de agregado, las cantidades necesarias para un pastón son de 440 g de cemento y 990 g de agregados, con una razón a/c de 0,47.

El moldeo debe realizarse en un tiempo total de 135 segundos después del mezclado y los moldes se deben llenar en dos capas; luego se colocan en la cámara húmeda durante 24 ± 2 horas.

2.2.1.3.- Procedimiento

Se desmoldan, se realiza una lectura preliminar, al 0,002 mm, posteriormente se colocan sumergidas en agua en una estufa a $80 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Pasado este tiempo se realiza la lectura inicial, previa haberlas secado superficialmente con un trapo absorbente húmedo. Las lecturas se deben realizar en 15 ± 5 segundos.

Luego se colocan sumergidas en la solución de hidróxido de sodio a $80 \pm 2^\circ\text{C}$. Posteriormente se deben realizar por lo menos 3 lecturas intermedias hasta los 14 días de inmersión a la misma hora. Se puede continuar el ensayo con una lectura por semana.

Para expansiones mayores a 0,015% la precisión interlaboratorio es de 9,55%, por lo tanto dos ensayos en dos laboratorios distintos no deben diferir en más de 27% de la expansión promedio.

2.2.2.- CSA A23-2-25A

Cuando se desarrollan expansiones excesivas, es recomendable obtener información complementaria para confirmar si la expansión es debido a la RAS, esto se puede realizar mediante petrografía y observar las probetas después de terminado el ensayo; cuando se confirma, se pueden hacer estudios adicionales como el prisma de hormigón. Se detecta la RAS en 16 días en barras de mortero.

- *Moldes*: Tienen una dimensión de 25 mm de lado y 285 mm de longitud.
- *Pernos*: De acero inoxidable de 22,5 mm de longitud y 6 mm de diámetro.
- *Comparador de longitudes*: Similar a norma IRAM 1674, excepto que la menor división es de 0,002 mm y el recorrido de 8 mm.
- *Solución de hidróxido de sodio*: Igual que la norma IRAM 1674.

2.2.2.1.- Acondicionamiento

Se debe mantener la temperatura de la sala de moldeo, aparatos y material seco entre 20 y 26 °C con una HR mayor al 50%. El agua de mezclado y la cámara húmeda en $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y la temperatura del baño de inmersión en $80 \pm 2^\circ\text{C}$.

2.2.2.2.- Muestreo y preparación de las probetas

- *Agregados*:
 - El agregado fino propuesto como material para el hormigón, será procesado con un mínimo de trituración, con la siguiente granulometría: 10% del material entre 5,0 – 2,5 mm, 25% entre las fracciones 2,5 – 1,25 mm, 1,25 mm – 630 μm y 630 – 315 μm y un 15% entre 315 – 160 μm . Si el material para obtener la granulometría no alcanza, se puede triturar y completar con otra fracción, luego se lava, se seca y se almacena para su uso.

- El agregado grueso igual que en la norma IRAM 1674. Cuando hay material grueso y fino de la misma procedencia, se ensaya el fino.
- *Cemento*: Tipo 10 de CSA, similar que norma IRAM 1674, con contenido total de álcalis equivalente de $0,9\pm 0,1\%$. Se debe usar periódicamente un agregado reactivo como control.
- *Preparación de las probetas*: Igual que la norma IRAM 1674, salvo que para un agregado fino natural la a/c es de 0,44 y para agregado grueso o arena de trituración la a/c es de 0,5. El moldeo igual que norma IRAM 1674. Experiencias realizadas en el LEMIT, califican al agregado de igual manera, y la variación es del orden del 5% [6].

2.2.2.3.- Procedimiento

Igual que la norma IRAM 1674. En cuanto al coeficiente de variación, si la expansión es mayor a 0,1% el mismo es de 2,94%, por lo tanto dos resultados de ensayo dentro del mismo laboratorio no debe ser mayor de 8,3%. En ensayos de interlaboratorio si la expansión es mayor al 0,1% el coeficiente de variación es de 15,2%, por lo tanto en dos ensayos en dos laboratorios distintos, la variación no debe ser mayor que el 43%.

2.2.3.- ASTM C 1260

Especialmente usado para agregados que reaccionan lentamente o los que producen una expansión tardía, sin embargo no permite evaluar la combinación de agregados con materiales cementicios. Las condiciones del ensayo no son representativas del hormigón en servicio. Cuando se producen expansiones excesivas, hay que obtener información suplementaria para comprobar que es debido a la RAS, para tomar medidas para mitigarla. Detección de la RAS en 16 días en barras de mortero.

- *Moldes*: Tienen una dimensión de 25 mm de lado y 285 mm de longitud.
- *Pernos*: De acero inoxidable de 22,5 mm de longitud y 6 mm de diámetro.
- *Comparador de longitudes*: Similar a norma IRAM 1674, excepto que la menor división es de 0,002 mm y el recorrido de 8 mm.
- *Solución de hidróxido de sodio*: Igual que norma IRAM 1674.

2.2.3.1.- Acondicionamiento

La temperatura de la sala de moldeo y materiales debe estar entre 20 y 27,5°C y la HR mayor al 50%. La temperatura de la cámara húmeda y del agua de mezclado debe ser de 20±1,7°C, similar a la norma IRAM 1674. La temperatura del baño 80±2°C.

2.2.3.2.- Muestreo y preparación de las probetas

- *Agregados:* Igual a norma IRAM 1674
- *Cemento:* Debe cumplir con ASTM C150, la expansión en autoclave debe ser menor de 0,2%. Antes de ser utilizado se debe pasar por el tamiz 850 µm (N°20).
- *Preparación de las probetas:* Igual norma IRAM 1674.

2.2.3.3.- Procedimiento

Igual norma IRAM 1674. En cuanto a los coeficientes de variación se consideran igual que la norma CSA A23-2-25A.

2.2.4.- RILEM AAR-2

Utilizado para la detección rápida de la RAS en barras de mortero inmersas en una solución de NaOH a elevada temperatura. Se puede determinar el comportamiento “pessimum” de algunos agregados de reacción rápida, pues en los de reacción lenta no se produce [6]. El método no es recomendable para detectar RAS de agregados que contienen más del 2% de chert, debido a que algunas veces se pueden obtener resultados inapropiados, ya que este método no los detecta.

- *Moldes:* Son de acero de 25 x 25 mm de sección y de 285 mm de longitud, pueden ser aceptables de 250 o 300 mm de longitud.
- *Pernos:* De 6 mm de diámetro y 20 mm de longitud.
- *Comprador de longitudes:* Igual norma IRAM 1674.
- *Solución de hidróxido de sodio:* Igual norma IRAM 1674.

2.2.4.1.- Acondicionamiento

La temperatura de la sala de moldeo, aparatos, material seco y agua de mezclado debe ser de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y la HR mayor a $65\pm 5\%$ y la cámara húmeda de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y HR mayor al $90\pm 5\%$.

2.2.4.2.- Muestreo y preparación de las probetas

- **Agregados:**
 - El agregado fino natural en estudio se usa con la granulometría propia excepto las partículas mayores a 4 mm que se trituran y se incorporan, salvo que el examen petrográfico confirme que no hay diferencias con las partículas que pasan. El agregado fino triturado, se ensaya de acuerdo a la siguiente granulometría: 10% del material entre 4,0 – 2,0 mm, 25% entre las fracciones 2,0 – 1,0 mm, 1,0 mm – 500 μm y 500 – 250 μm y un 15% entre 250 – 125 μm en peso.
 - El agregado grueso se tritura y tamiza para obtener la granulometría anterior. El agregado grueso al triturarse a tamaño arena puede incrementar la expansión, debido a que se incrementa la superficie expuesta. Posteriormente, si el agregado grueso es reactivo se recomienda hacer probetas de hormigón.
 - Agregados gruesos y finos, para hacer hormigón, se deben separar por el tamiz de 4 mm o equivalente y ensayarlos por separado. Lavar y secar la muestra de 100 a 110°C durante 16 horas.
- **Cemento:** Debe ser normal CEM I o Tipo I (ASTM) con Na_2O equivalente de 1%. La superficie específica de 450 m^2/kg . La expansión en autoclave menor de 0,2%. Estabilidad de MgO, el indicador final 0 mm.
- **Preparación de la probetas:** Similar a norma IRAM 1674, la mínima cantidad de material para realizar probetas de 25x25x285 mm será de 400 g de cemento y 900 g de agregados.

La razón a/c de 0,47, agua libre para hidratación y trabajabilidad. La fluidez tiene que estar comprendida entre 205 a 220 mm, si es menor que 205 mm se puede usar superplastificante. El inicio del moldeo no debe superar los 3 minutos después del mezclado. Se llena en dos capas.

2.2.4.3.- Procedimiento

Similar a norma IRAM 1674, pues, las lecturas siguientes se realizan periódicamente con una lectura después de 24 horas de inmersión en NaOH y hasta 3 intermedias hasta los 14 días a 80°C. Si se desea se puede medir en intervalos de 24 horas y continuar después de los 14 días.

Para expansiones mayores a 0,1% la repetitividad se considera satisfactoria si la expansión de cada probeta está dentro del 10% de la media. Para expansiones menores a 0,1% es satisfactoria cuando la desviación de la media está dentro del 0,01%. Después de la medida final se observan las probetas, si hay combaduras se miden las tres probetas colocándolas sobre una superficie plana y se estima al 0,2 mm.

3.- ANALISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS

3.1.- Síntesis de los métodos de prisma de hormigón

En la tabla siguiente se sintetizan los métodos que emplean prismas de hormigón para evaluar la RAS.

PRISMAS DE HORMIGON				
Descripción	IRAM 1700	CSA-A23-2-14A	ASTM C1293	RILEM AAR-3
Moldes (mm)	75x75x275 75x75x405	75x75x275 75x75x405	75±0.7 250	75±5 /250±50 400x100x100
Comparador de longitudes	Recorrido 7,5 mm 0,0025mm	Recorrido 8 mm 0,002 mm Dispositivo para compensar peso probeta	Recorrido 8 mm 0,002 mm	0,002 mm
Contenedores de almacenamiento	Plástico de 25 a 30 lts 6 mm de espesor	Plástico de 22 a 25 lts	Plástico de 22 lts	Individuales. Separación entre probeta y contenedor entre 5 y 20 mm
Bastidor y mecha	35±5 mm del fondo. Papel secante	30-40 mm del fondo. Material absorbente	30-40 mm del fondo. Material absorbente	30 mm del fondo. Papel secante
Temperatura cámara	38±2 °C	38±2 °C	38±2 °C	38±2 °C
Tipo y proporción de cemento	CPN 0,9±0,1% de álcalis 420±10 kg/m ³	Tipo 10 0,9±0,1% de álcalis 420±10 kg/m ³	Tipo I 0,9±0,1% de álcalis 420±10 kg/m ³	Normal 0,9±1,2% de álcalis 14% Volumen del hormigón
NaOH	1,25% del peso de cemento	1,25% del peso de cemento	1,25% del peso de cemento 5,25 kg/m ³ en el hormigón	1,25±0,05% del peso de cemento 5,50 kg/m ³ en el hormigón
Determinación del agregado no reactivo	< 0,1% IRAM 1674 0,015% IRAM 1700	< 0,1% CSA-A23-2-25A 0,015% CSA-A23-2-14A	< 0,1% ASTM C1260	< 0,05% RILEM AAR-2
Fraciones del agregado grueso (mm)	20-14 33% 14-10 33% 10-4 33%	20-14 33% 14-10 33% 14-5 33%	19-12,5 33% 12,5-9,5 33% 9,5-4,75 33%	0-4 30% 10-4 30% 20-10 40%
Relación Ag/Af en masa	60:40	60:40	Volumen x vol de H° 0,70±0,2	70:30
a/c	0,42 a 0,45	0,42 a 0,45	0,42 a 0,45	20% agua en volumen
Mezclado y compactación	Mecánico. 1 punzonada cada 7 cm ²	Mecánico. 1 punzonada cada 7 cm ²	< 7 litros manual sino mecánico.	Vibración
Procedimiento	Envolver en tela, tubo y bolsa de polietileno	Sin envoltura y bolsa	Sin envoltura y bolsa	Envolver en tela, tubo y bolsa de polietileno.
Lectura inicial	24±2 hs del desmolde	4 hs del desmolde	23,5±0,5 hs del desmolde	24 hs del desmolde y se pesan
Lecturas 38±2°C	1-2-4-8-13-18-39-52 semanas	1-2-4-8-13-26-39-52 semanas	1-4-8-12-24-36-52 semanas	1 sem a 20±2°C 2-4-13-26-52 semanas a 38±2°C
Límites de expansión (%)	< 0,04 NR > 0,04 R	< 0,04NR 0,04-0,12 MR > 0,12 R	< 0,04 NR > 0,04 R	< 0,05 NR 0,05 – 0,10* > 0,10 R

* Depende de la experiencia local, pero se considera potencialmente reactivos.

3.2.- Síntesis de los métodos acelerados de la barra de mortero

BARRA DE MORTERO				
Descripción	IRAM 1674	CSA-A23-2-25A	ASTM C1260	RILEM AAR-2
Consideración	Reacción lenta. No evalúa combinaciones de agregados	Obtener mayor información con expansiones excesivas	Reacción lenta. No evalúa combinaciones de agregados	Comportamiento pessimum. No recomendable >2% de chert
Moldes	25±0,5 mm 250±2 mm	25x25 mm 285 mm	25x25 mm 285 mm	25x25 mm 285 mm
Solución NaOH	4% NaOH 4±0,5 del volumen de las barras	4% NaOH 4±0,5 del volumen de las barras	4% NaOH 4±0,5 del volumen de las barras	4% NaOH 4±0,5 del volumen de las barras
Temperatura del baño	80±2°C	80±2°C	80±2°C	80±2°C
Granulometría agregado fino y grueso	4,75-2,36 10% 2,36-1,18 25% 1,18-600 25% 600-300 25% 300-150 15%	5,0-2,5 10% 2,5-1,25 25% 1,25-630 25% 630-315 25% 315-160 15%	4,75-2,36 10% 2,36-1,18 25% 1,18-600 25% 600-300 25% 300-150 15%	4,0-2,0 10% 2,0-1,0 25% 1,0-500 25% 500-250 25% 250-125 15%
Cemento	Cumplir IRAM 50000	Tipo 10 (Na ₂ O) _e 0,9±0,1%	Cumplir ASTM C150, expansión autoclave <0,2%	CEM I o Tipo I (Na ₂ O) _e 1% Sup Esp 450 m ² /kg Exp auto <0,2%
Proporciones	1 cto y 2,25 agregados, a/c 0,47	1Cto y 2,25 agregados, a/c 0,44 natural y 0,5 triturado	1Cto y 2,25 agregados, a/c 0,47	1Cto y 2,25 agregados, a/c 0,47
Procedimiento	24±2 hs en CH 24 hs en agua 80±2°C 14 días en solución NaOH a 80±2°C	24±2 hs en CH 24 hs en agua 80±2°C 14 días en solución NaOH a 80±2°C	24±2 hs en CH 24 hs en agua 80±2°C 14 días en solución NaOH a 80±2°C	24±2 hs en CH 24 hs en agua 80±2°C 14 días en solución NaOH a 80±2°C
Lectura inicial	Después de 24 hs en agua a 80±2°C	Después de 24 hs en agua a 80±2°C	Después de 24 hs en agua a 80±2°C	Después de 24 hs en agua a 80±2°C
Lecturas	3 intermedias hasta los 14 días de inmersión.	3 intermedias hasta los 14 días de inmersión	3 intermedias hasta los 14 días de inmersión	1lectura a 24 hs 3 intermedias hasta los 14 días de inmersión
Límites de expansión (%)	< 0,100 NR > 0,200 R	< 0,150 NR > 0,150 R	< 0,100 NR > 0,100 R	< 0,100 NR > 0,100 R

4.- CONCLUSIONES

El análisis de las normativas para evaluar la reactividad potencial de los agregados, ya sea a través de métodos acelerados en morteros o de larga duración en hormigones, se pueden obtener las siguientes consideraciones:

- Para las cuatros normas estudiadas, el método del prisma de hormigón demanda un año y el método acelerado de la barra de mortero 16 días.
- Cuando se evalúa el comportamiento del agregado grueso en el hormigón, el agregado fino debe ser no reactivo y viceversa. Para tal fin, la norma europea es más estricta, considera el límite de 0,05% con el método acelerado cuando para las restantes es de 0,1% al término de 14 días de inmersión.
- La norma europea, RILEM AAR-3, indica que las probetas de hormigón quedan almacenadas a 20°C hasta la lectura inicial, realizada a los siete días de la elaboración, lo que implica una diferente estructura interna del hormigón, por lo que el material es menos poroso y habrá una mayor presión interna de los geles, no asegurando que la expansión final sea mayor.
- La norma canadiense tiene en cuenta el peso de la probeta de hormigón sobre la medida de la longitud, aplicando un dispositivo para tal fin.
- La norma europea establece colocar las probetas de hormigón de manera individual en los recipientes de almacenamiento, dentro de un reactor.
- En el método acelerado de la barra de mortero, la norma europea, indica que debe tenerse en cuenta el comportamiento pessimum de los agregados. Este comportamiento está referido al porcentaje del material reactivo a utilizar en una mezcla con un material de referencia no reactivo, de acuerdo al origen mineralógico de los agregados se determina cual es el porcentaje que produce mayor expansión. La normativa sugiere seis combinaciones de morteros con porcentajes variados de material reactivo.

- Las normas de Argentina y USA destacan que el método acelerado de la barra de mortero puede detectar agregados de reacción lenta y que no es recomendable para evaluar combinaciones de agregados.

- La norma canadiense para barras de mortero indica diferente razón a/c según el origen del agregado natural o de trituración. Esta variación se realiza para mejorar la trabajabilidad del mortero y lograr un buen llenado de los moldes.

- Las críticas más destacadas que se han objetado del método acelerado de la barra de mortero, son las condiciones de ensayo, las cuales son muy rigurosas, si se comparan con las condiciones de exposición de la estructura real. En el método del prisma de hormigón la cuestión es el tiempo de duración del ensayo, que se considera muy prolongado.

- A pesar de las diferencias en los procedimientos de ensayo de acuerdo al origen de la normativa, califican de igual manera a los agregados. En el caso del método del prisma de hormigón, las normas de Canadá y USA no indican envolver las probetas de hormigón con una tela para mantener la humedad, lo cual puede implicar menores reacciones. Experiencias realizadas en el LEMIT, indican que se obtienen resultados más confiables cuando se envuelven las probetas con tela, con lo cual las expansiones son superiores, entre un 12 a 15% y en algunos casos llegan hasta un 50%. La norma europea cambió con posterioridad a la normativa argentina, con respecto a este tema.

5.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201. INTI, 2005.

- 2.- Norma IRAM 1874-2. Agregados para hormigones. Evaluación de estructuras en servicio. Reacción álcali-sílice, 2004

- 3.- Grattan-Bellew, P. E., "Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 279, 1989.

- 4.- Batic, O.R., Sota, J. D. y Falcone, D. D. "RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta." Revista Ciencia y Tecnología N° 12, p 13, 2005.
- 5.- Batic, O. R., Sota, J. D. y Falcone, D. D. "Reacción álcali-sílice. Comparación de resultados en métodos acelerados para detectar agregados reactivos." 15^{ta} Reunión Técnica, AATH, Santa Fe. Soporte electrónico, 2003.
- 6.- Batic, O. R., Sota, J. D. "Reacciones deletéreas internas". Durabilidad del Hormigón Estructural. Editado por Fabian Irassar, AATH, Capítulo 4, p 157, 2001.
- 7.- Norma IRAM 1674. "Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero". Argentina, 1997.
- 8.- Norma IRAM 1700. "Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcalis-agregado". Argentina, 1997.
- 9.- ASTM C 1260-01. "Standard test method for potential alkali reactivity of aggregate (mortar-bar method)". Americana, Volume 04.02, Concrete and aggregates, p 677, 2008.
- 10.- ASTM C1293-01."Standard tests method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction". Americana, Volume 04.02, Concrete and aggregates, p 682, 2008.
- 11.- RILEM AAR-2. "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates. The ultra-accelerated mortar-bar test". Europea, 2000.
- 12.- RILEM AAR-3. "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates. Method for aggregate combinations using concrete prisms". Europea, 2000.
- 13.- CSA-A23.2-25A. "Test method for detection of alkali-silica reactivity aggregate by accelerated expansion of mortar bars". Canadiense, p 240, 2000.

14.- CSA-A23.2-14A. "Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms". Canadiense, p 207, 2000.

CAPITULO 3

ANTECEDENTES EXPERIMENTALES DEL LEMIT (Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica)

1.- INTRODUCCION

En el mundo, las primeras estructuras de hormigón que evidenciaron manifestaciones debidas a la RAS datan de 1920 [1], mientras que en Argentina los primeros antecedentes de la reacción son de 1950 [2]. Estas manifestaciones crean la necesidad de evaluar este tipo de patología y de realizar estudios previos en los agregados para evitar que se produzca el deterioro prematuro de las estructuras de hormigón.

Los estudios para determinar el grado de reactividad potencial de los agregados, finos y gruesos, se realizan mediante ensayos de laboratorio normalizados. Los pioneros, en la Argentina, en el estudio de este tema fueron los Ings. Alberto S. C. Fava y José F. Colina como así también el Dr. en Geología César Cortelezzi y el Lic. en Química Raúl Manuele al inicio de la década de 1960 [2], que luego prosiguieron hasta la actualidad los Ings. Marcelo Wainsztein, Oscar R. Batic y otros.[3]

En este capítulo se realiza una recopilación de los resultados de los ensayos para evaluar la Reacción Alkali Sílice (RAS) realizados en el LEMIT, a partir de 1965 hasta la actualidad. Con una perspectiva evolutiva de la normativa se discuten los resultados obtenidos y la correlación entre distintos ensayos, los cambios producidos en los métodos de ensayo y las propuestas de nuevos ensayos como así también las distintas pruebas de las soluciones tecnológicas para reducir o inhibir la expansión y el deterioro que provoca la RAS en las estructuras de hormigón.

2.- ENSAYOS NORMALIZADOS

2.1.- Método de la barra de mortero IRAM 1637 (ASTM C 227)

En 1965, se realizaron la primera serie de ensayos para estudiar los agregados de dos importantes obras de infraestructura de la Argentina: el Túnel Subfluvial Hernandarias ubicado entre las ciudades de Santa Fe y Paraná [4], y el Dique El Nihuil ubicado en la provincia de Mendoza. El método de ensayo IRAM 1637 fue normalizado en 1966.

Para el Túnel Subfluvial, se realizaron doce series de ensayos con cuatro agregados y tres cementos portland con contenido variable de álcalis. Los estudios petrográficos realizados en la época mostraron que: el agregado 2 (Ag2) es una arena fina con bajo contenido de calcedonia (1,33%); el agregado 3 (Ag3) una arena gruesa y los agregados 1 y 4 son agregados gruesos de cantos rodados todos con elevado contenido de calcedonia y probablemente una baja proporción de ópalo (difícil de determinar en aquella época). Los estudios mineralógicos permiten presumir que los agregados son potencialmente reactivos con los álcalis contenidos en el hormigón. Los cementos portland utilizados TS1, TS2 y TS3 presentan un contenido de álcalis 0,32%, 0,30% y 1,15%, expresado como Na_2O_e , respectivamente.

Los resultados de la expansión obtenidos en las barras de mortero se muestran en la figura 1. A pesar que los agregados contienen minerales potencialmente reactivos (calcedonia y ópalo) y cuando se utilizó un cemento de alto álcalis (TS3), el método no acusó expansión significativa para los cuatro agregados evaluados. A medida que transcurrió el tiempo de estacionamiento se observó un incremento de la contracción. También se puede observar en la figura 1 d que la expansión cae bruscamente a la edad de 5 meses y a los 6 meses la recupera. A los 12 meses, todas las combinaciones de agregado-cemento estudiadas presentan un cambio de longitud negativo (contracción), este cambio de longitud es menor al límite de expansión propuesto por la normativa y por lo tanto los agregados deberían clasificarse como no reactivos. Hasta el presente no se han detectado síntomas de RAS en la obra, luego de más de 40 años en servicio.

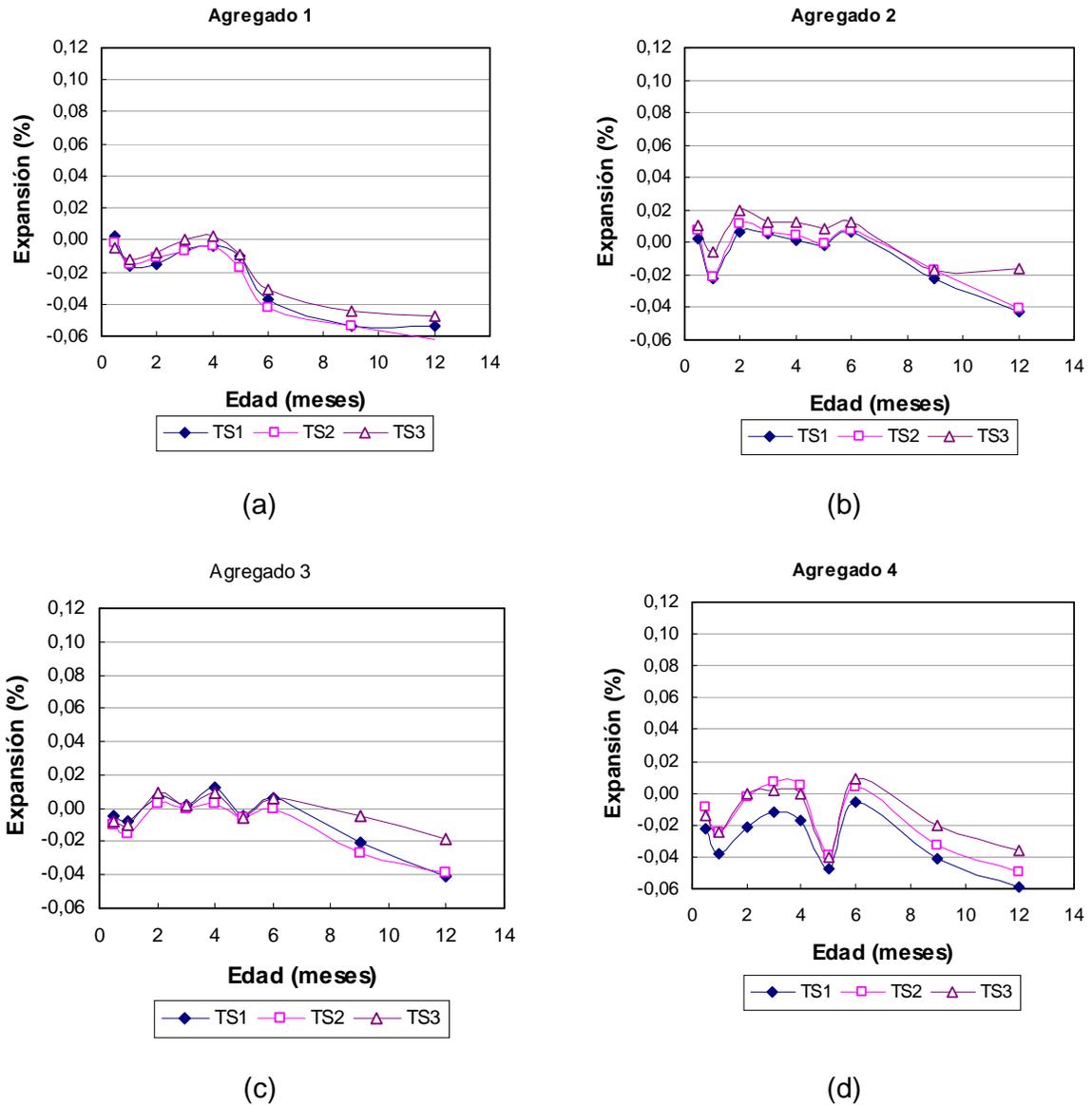


Figura 1. Evolución de la expansión de los cuatro agregados estudiados para el Túnel Subfluvial con cementos TS1, TS2 y TS3 conteniendo 0,32%, 0,30% y 1,15% de Na_2O_e

Este comportamiento debe analizarse en relación con la metodología y recursos para llevar adelante el ensayo. En sus comienzos, los contenedores de almacenamiento de las probetas presentaban un cierre que consiste en un cuenco que se llena de agua para producir un sellado hidráulico de la tapa. Para mantener el sellado hidráulico se necesita un control periódico de la presencia de agua en el cuenco, ya que es la forma de evitar la evaporación del agua de estacionamiento de las probetas. Como la temperatura de estacionamiento es de 38 ± 2 °C se evaporaba fácilmente el agua del sellado y como

consecuencia el agua en el interior del recipiente de estacionamiento, faltando humedad a las probetas para que se produzca la reacción. Este fue uno de los mayores inconvenientes que adolecía el método de ensayo. En la figura 2 se muestra el contenedor de almacenamiento.



Figura 2. Contenedores de almacenamiento utilizados para el ensayo IRAM 1637 y detalle del cierre hidráulico

En los estudios previos del Dique El Nihuil se analizaron nueve combinaciones de agregado-cemento derivada de tres agregados y tres cementos portland. El agregado 1 corresponde a una arena constituida principalmente por tobas clara y oscura (48%). El agregado grueso 2 son tobas claras y oscuras, clasificándose como toba cristalina riolítica, siendo las claras con mayor grado de alteración que las oscuras. El agregado 3 se clasifica como una toba cristalovítrica de grano fino.

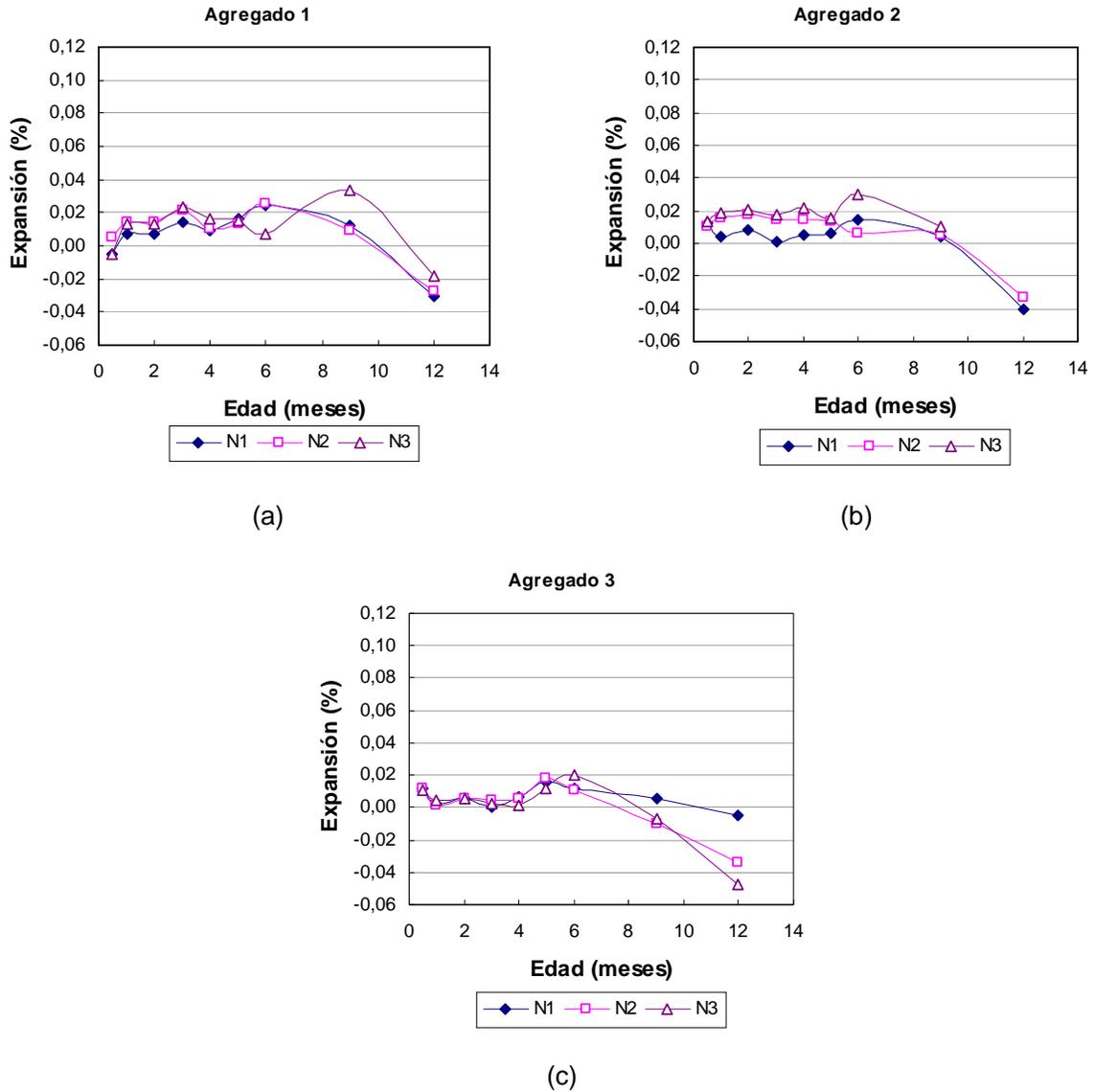


Figura 3. Evolución de la expansión de los cuatro agregados estudiados para el dique El Nihuil con cementos N1, N2 y N3 conteniendo 1,15%, 0,91% y 0,92% de Na_2O_e

Los resultados se indican en la figura 3. Las barras constituidas por los tres agregados con los tres cementos presentaron expansión hasta la edad de 6 a 8 meses y luego ocurre un cambio de pendiente del cambio de longitud llegando a valores negativos (contracción) a los 12 meses. Como las expansiones no se manifestaron, los agregados deberían clasificarse como inocuos a pesar de que los agregados de Mendoza son clasificados potencialmente reactivos porque contienen vidrio volcánico. Para esta serie de ensayos, los resultados muestran un comportamiento similar a los ensayos realizados para el Túnel Subfluvial, a largas edades predomina un proceso de contracción de la

longitud de las barras. Este proceso fue atribuido a la pérdida de humedad relativa de los contenedores de almacenamiento y a que la circulación de la humedad produce la lixiviación de los álcalis disminuyendo la reacción deletérea. En esta obra se han presentados síntomas atribuible a la RAS. (Figura 4).



Figura 4. Pilares de Dique El Nihüil - Mendoza

Otras experiencias realizadas en aquella época corresponde al análisis de dos agregados, un canto rodado y una arena, procedentes del yacimiento del Valle del Río Diamante (Mendoza) en combinación con dos cementos portland normal de distinta procedencia, uno de Mendoza y otro de Comodoro Rivadavia.

En la figura 5 se muestra los resultados de la expansión, la cual crece a medida que transcurre el tiempo. En ella se observa que ambos agregados combinados con el cemento RD2 superan el límite de expansión (0,10%) a los 12 meses propuestos para considerar a los agregados como reactivos. Por otro lado, la combinación del agregado 1 con el cemento RD1 presentó una expansión cercana a límite a los 12 meses, mientras que para el agregado 2 la expansión fue mucho menor a todas las edades y al límite de 12 meses. A diferencia del conjunto de materiales estudiados para el Túnel Subfluvial y el Dique El Nihuil, estos agregados posiblemente contienen un mayor porcentaje de minerales reactivos (vidrio volcánico) que permitió el desarrollo de expansiones a pesar de las deficiencias previamente citadas para el método.

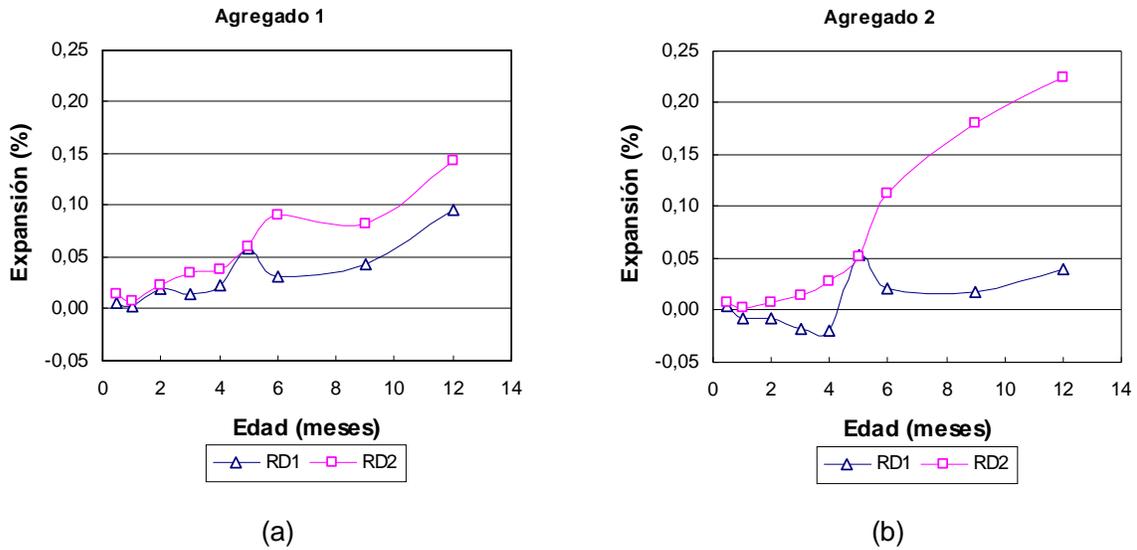


Figura 5. Evolución de la expansión de dos agregados del Río Diamante, Mendoza con cemento RD1 y RD2 conteniendo 0,68 % y 1,29 % de Na_2O_e

Utilizando un agregado compuesto por una arena silícea adicionada con el 4% de ópalo, en peso, se estudió su combinación con ocho cementos portland de distinta procedencia. En la figura 6 se informan los resultados de las mezclas agrupadas entre aquellas de baja expansión y las de muy alta expansión.

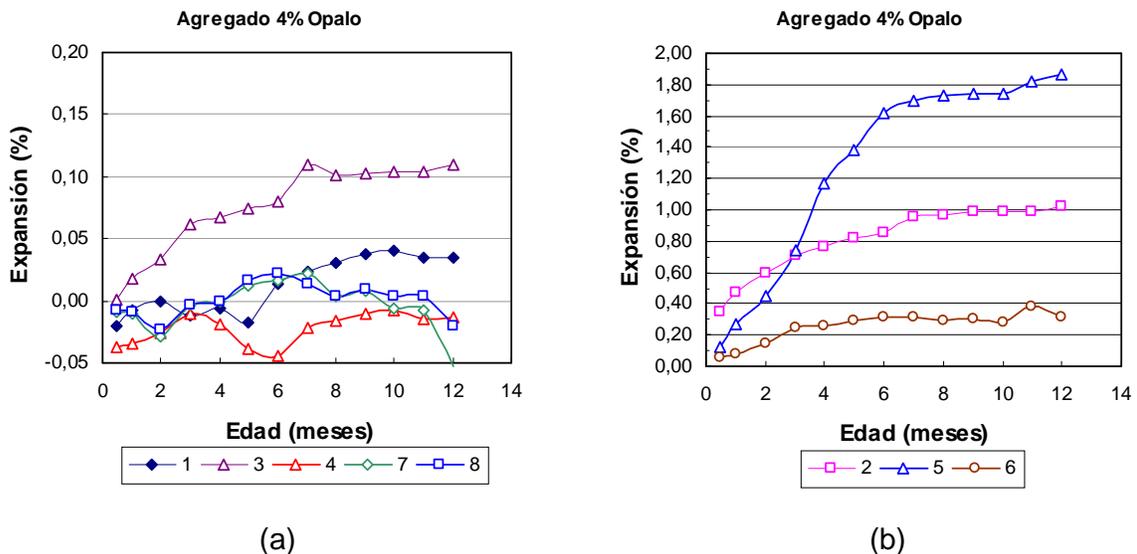


Figura 6. Evolución de la expansión de un agregado fino con 4% de ópalo ensayado con cementos de distinta procedencia.

Los cementos 1, 8 y 4 con contenido de álcalis de 0,44 %, 0,34 % y 0,26 % de Na_2O_e respectivamente (Figura 6a) presentan una expansión inferior al límite siendo una solución tecnológica, excepto con el cemento 3 (0,49 % de Na_2O_e). Los cementos 2, 5 y 6 con mayor contenido de álcalis (0,98 %, 0,66 % y 0,55% de Na_2O_e) respectivamente presentan expansión muy superior al límite (Figura 6b) originado por la reacción entre la sílice amorfa del ópalo y los álcalis del cemento.

En 1968, la Comisión de estudio de la RAS [5] presentó su investigación sobre la reactividad potencial de las arenas del Río Paraná de diferentes procedencias. En este caso en particular se analizan algunas de arenas con la utilización de un cemento portland de alto álcalis (1,09% de Na_2O_e).

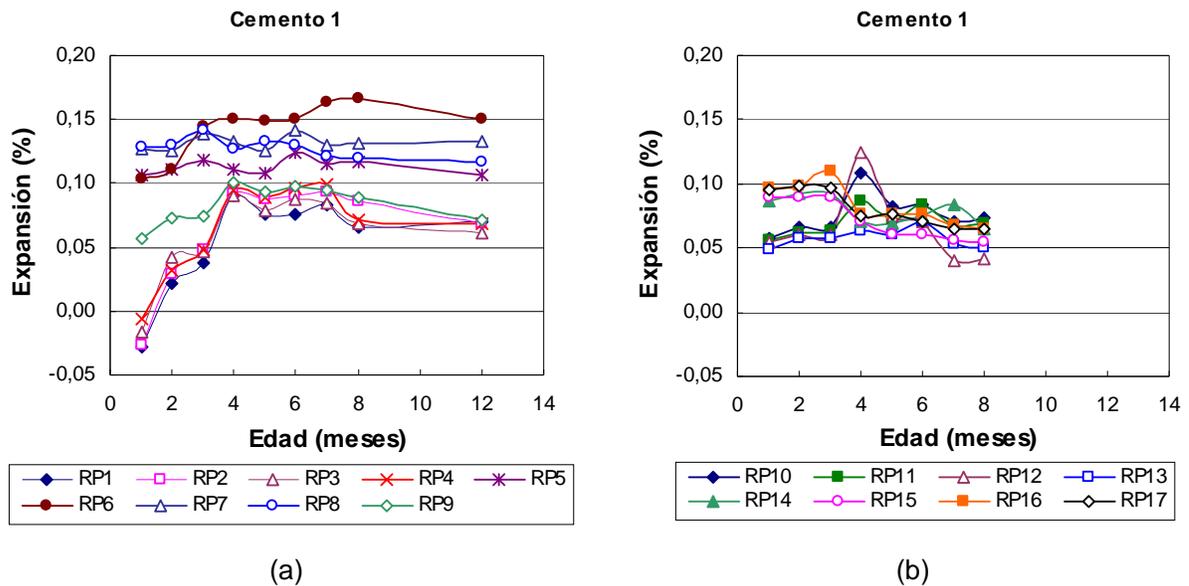
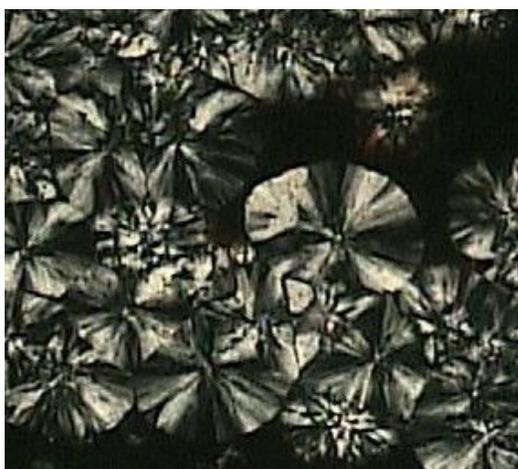


Figura 7. Evolución de la expansión de arenas provenientes del Río Paraná

En la figura 7a se muestran los resultados obtenidos. Para algunas arenas (RP1, RP2, RP3, RP4, RP9) se observa un crecimiento progresivo de la expansión en el tiempo hasta los 4 a 5 meses, para otras la expansión medida fue elevada desde el mes, algunas arenas superan el límite y otras no, pero el comportamiento de las expansiones sería aceptable sino sufrieron una pérdida de humedad. En la figura 7b, se observa una serie de arenas con una expansión cercana al límite en los primeros dos meses que luego disminuye progresivamente (RP15, RP16 y RP17). Otra serie de arenas, comienzan con una expansión menor, la cual se incrementa de manera importante a los cuatro meses

para luego volver a disminuir. Este comportamiento se puede deber a los dos factores mencionados anteriormente, pérdida de humedad y lixiviación de álcalis. En esta serie de ensayos, todas las mezclas estudiadas presentan cambios de longitud positivos.

La reactividad de las arenas se puede atribuir, en una primera aproximación, a la presencia ópalo finamente disperso en la calcedonia. Por ejemplo las muestras RP5, RP6 y RP8 tienen porcentajes de calcedonia de 1,9 %, 6,0 % y 2,1 % respectivamente. También existen calcedonias fibrosas y microcristalina y son consideradas no reactivas. Con lo cual la presencia de calcedonia no implica necesariamente que el material sea deletéreo [6]. En la figura 8a se ilustra una calcedonia fibrosa y microcristalina y en la figura 8b una calcedonia con ópalo finamente disperso.



(a)



(b)

Figura 8. Distintos tipos de calcedonia

Entre los primeros diques construidos en la Patagonia se encuentra el Embalse Florentino Ameghino, inaugurado en 1963 sobre el Río Chubut. Con posterioridad, en el año 1970, se realizaron estudios sobre el comportamiento de los agregados utilizados frente a la RAS con fines de investigación. Para ello se obtuvieron cinco muestras de agregados que se han caracterizado como riolitas constituida por fenocristales de cuarzo y feldespato en una pasta microcristalina, no contiene vidrio volcánico y el feldespato está levemente alterado a illita y el contenido de pasta en relación con los

fenocristales es 60/40. Los cementos utilizados en el estudio con alto contenido de álcalis (1,13 % de Na_2O_e) proceden de Pipinas (cemento 1) y de Comodoro Rivadavia (1,15% de Na_2O_e , cemento 2). Los resultados de los estudios se informan en la figura 9. Todas las mezclas presentaron una muy baja expansión y ninguno de los agregados estudiados superó el límite de expansión (0,10%) al término de un año. Para cada cemento el comportamiento de los agregados DA1 y DA5 fue similar y para el resto DA2, DA3 y DA4 el comportamiento se invirtió.

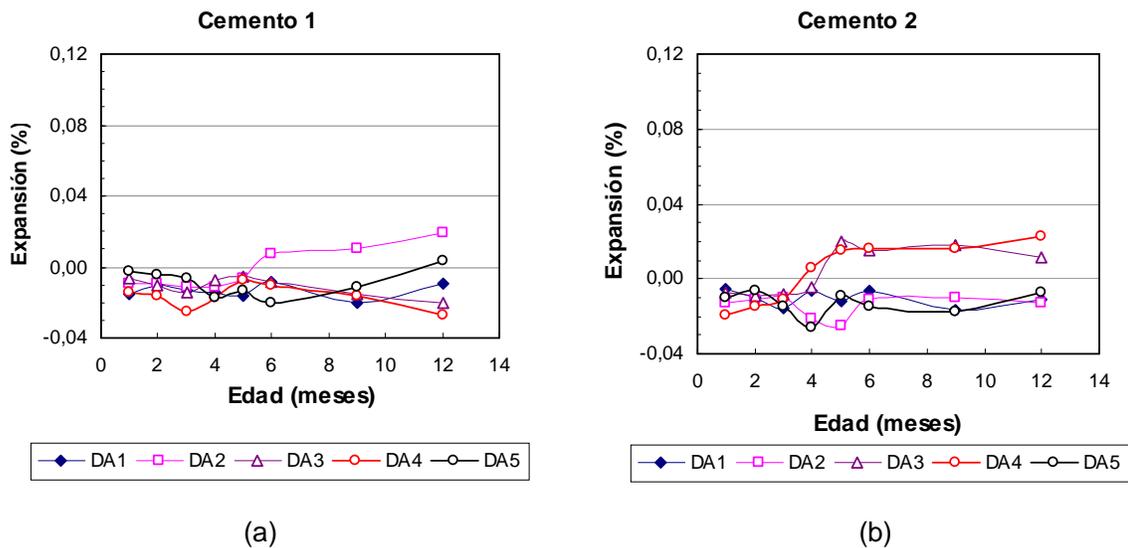


Figura 9. Evolución de la expansión de dos agregados del Dique Ameghino, Chubut con cemento de alto álcali procedente de (a) Pipinas y (b) Comodoro Rivadavia

El dique El Chocón se terminó de construir en 1973. Previo al inicio de la construcción (1970) se realizaron, en el LEMIT, los estudios sobre la RAS a los agregados que se utilizarían para elaborar el hormigón. En la figura 10 se muestran algunos de los resultados obtenidos con dos cementos, uno procedente de Pipinas (Cemento 1) con un tenor de álcalis de 1,13% y otro procedente de Olavarría (Cemento 2) con 0,46% de Na_2O_e .

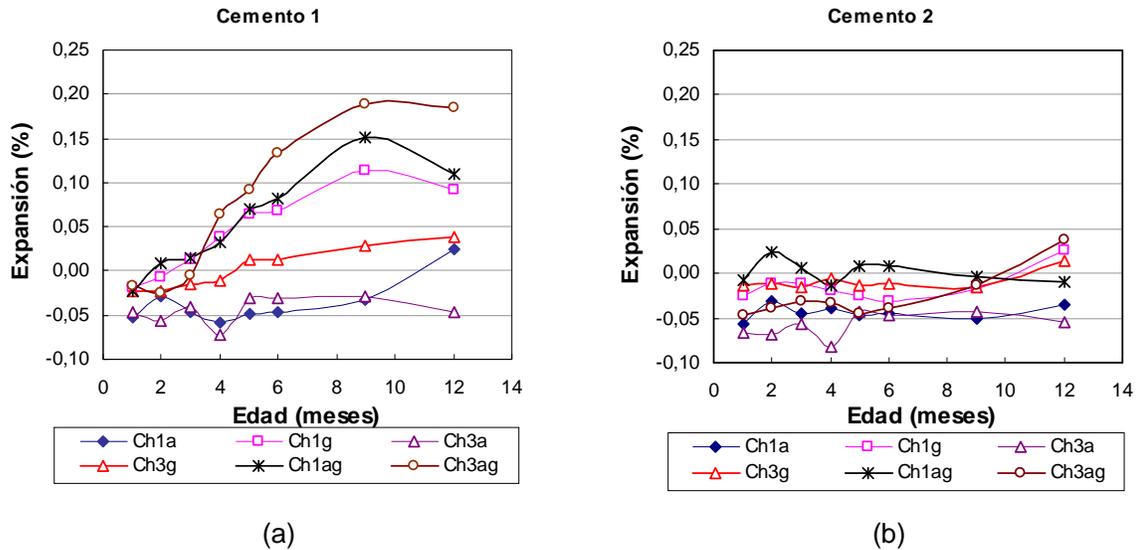


Figura 10. Evolución de la expansión de dos agregados del dique El Chocón, (Rio Negro-Neuquén) con cemento (a) de alto álcali y (b) de bajo álcali

En la figura 10a, se puede observar que los agregados finos (Ch1a y Ch3a) y el grueso (Ch3g) presentan un bajo desarrollo de expansión y no superan el límite de 0,10% al año. Por el contrario, este límite es superado por el agregado grueso Ch1g y también por su combinación con el fino (Ch1g + Ch1a) que se ve potenciada. En el caso de los agregados Ch3a y Ch3g, como se analizó anteriormente no presentaban expansión considerada, pero al combinarlos (Ch3g +Ch3a) superaron el límite de 0,10%, con lo cual se está evidenciando el efecto “pessimun” de los componentes reactivos de los agregados. En la figura 10b se observa que el cemento de bajo álcalis (Cem 2), atenuó los efectos deletéreos de la RAS y todas las expansiones son inferiores al límite máximo especificado.

La presencia de algunas obras deterioradas, especialmente pavimentos, por la patología atribuida a la RAS en la zona de Bahía Blanca determinó la necesidad de analizar los agregados de la zona. En aquella oportunidad se analizaron arenas y rodados procedentes de la región que son utilizadas para la elaboración de hormigón. Los mismos pertenecen a yacimientos de origen marino, fluvial y de cauce de río. En los depósitos marinos (BB1, BB2, BB6 y BB7) predominan las conchillas y el cuarzo, además contienen material volcánico integrado por vidrio (3 a 8%), tobas y alteritas como así también calcedonia en proporciones variables (5,0, 3,6, 0,3 y 2,0 respectivamente). En los depósitos fluviales (BB3, BB4 y BB5) predominan las rocas volcánicas, basaltos, tobas y

alteritas, calcedonia y vidrio volcánico son poco abundantes. Las muestras de cauce de río (BB8 y BB9) presentan un alto contenido de calcedonia, hasta 54% asociada a cuarzo, tobas, concreciones calcáreas y alteritas [7]. Todas las muestras fueron ensayadas con el método de la barra de mortero usando un cemento de alto álcalis (1,07%). En la figura 11 se muestra los resultados de la expansión.

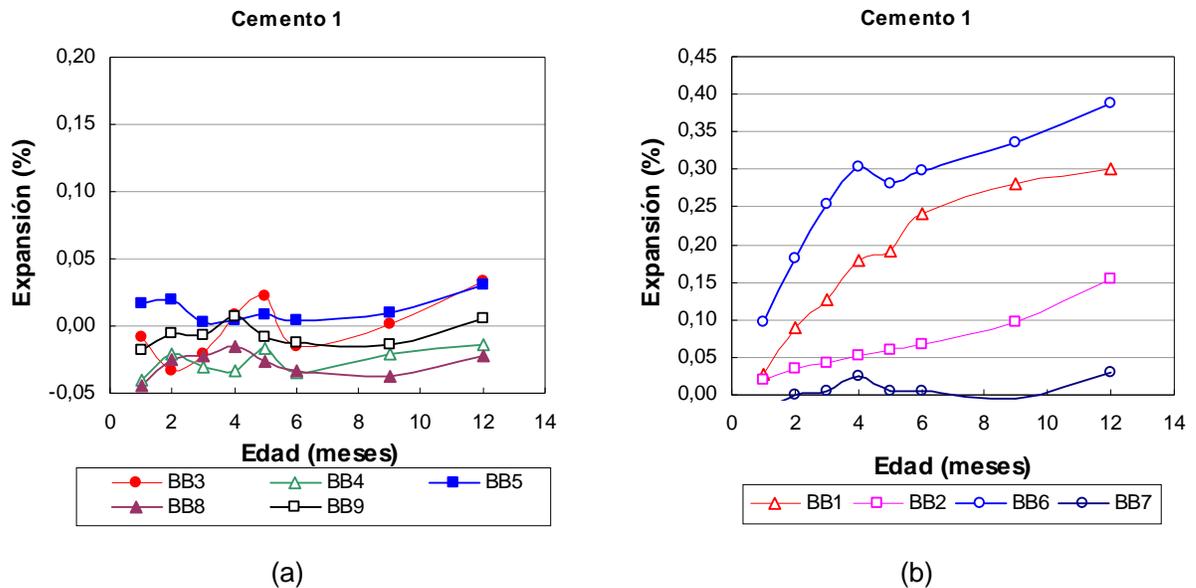


Figura 11. Evolución de la expansión de los arenas cercanas a Bahía Blanca

En la figura 11a se observan los agregados de origen fluvial y depósito de cauce de río, los cuales presentan una expansión inferior al límite y en la figura 11b se observan los agregados de origen marino los cuales superan el límite excepto el agregado identificado como BB7.

Finalizado el ensayo, en algunas de las probetas se realizaron estudios petrográficos. Por ejemplo, en las muestras BB3, BB4, BB5 y BB7 se observaron abundantes geles pero la expansión no superó el límite especificado. Por otro lado, las muestras BB8 y BB9 tienen escasa evidencia de RAS al ser observadas al microscopio. En las muestras BB1, BB2 y BB6, que superan el límite de expansión 0,10%, se observaron abundantes geles y fisuras. Los resultados obtenidos muestran algunas incongruencias como la baja expansión y las manifestaciones de la RAS en las probetas,

volviendo a revelar tal vez los inconvenientes del método de ensayo para mantener la humedad necesaria para el progreso de la reacción.

En 1972 comienza a construirse el dique “Pasos de las Carretas” en la Provincia de San Luis, sobre el Río Quinto, cuya inauguración se realizó en 1982. Entre fines de 1973 y comienzos de 1974 se hicieron los estudios de reactividad de los agregados a usar en la obra.

Los cementos 1 y 2 utilizados para realizar los ensayos son de alto contenido de álcalis, 0,94% y 1,07%, respectivamente.

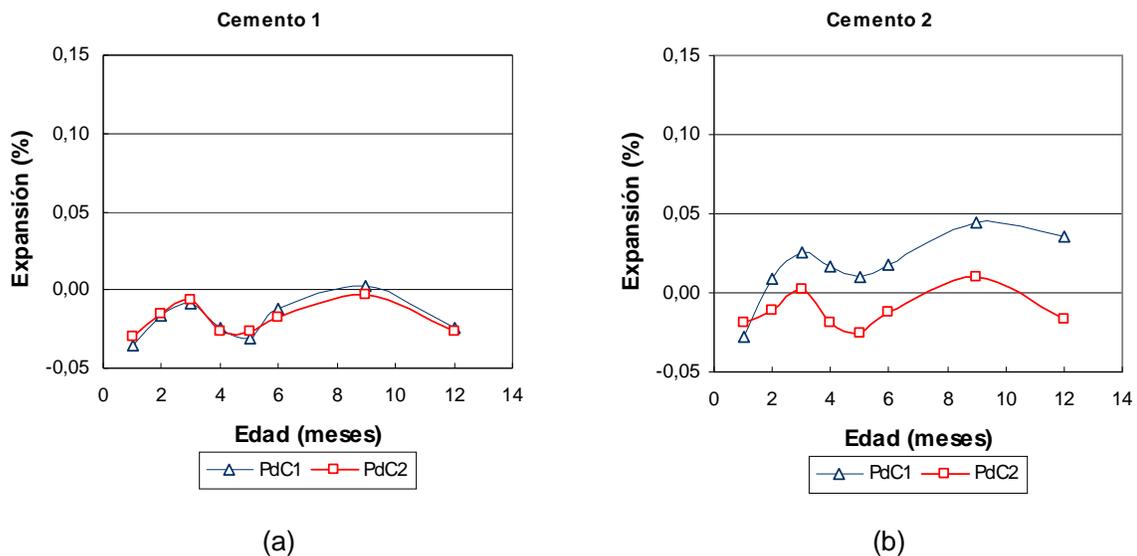


Figura 12. Evolución de la expansión de los agregados del Dique Paso de Carretas en San Luis: utilizando cemento de alto contenido de álcalis (a) 0,94% y (b) 1,07%

Los resultados de los ensayos se indican en la figura 12. Para el Cemento 1, no se observó expansión durante los 12 meses, mientras que con el Cemento 2 el agregado PdC1 presenta cierta expansión, pero su valor no supera el límite; sin embargo los estudios petrográficos (Figura 13) realizados sobre los prismas de mortero luego de un año confirman la presencia de RAS con manchas muy abundantes con restos de reacción.

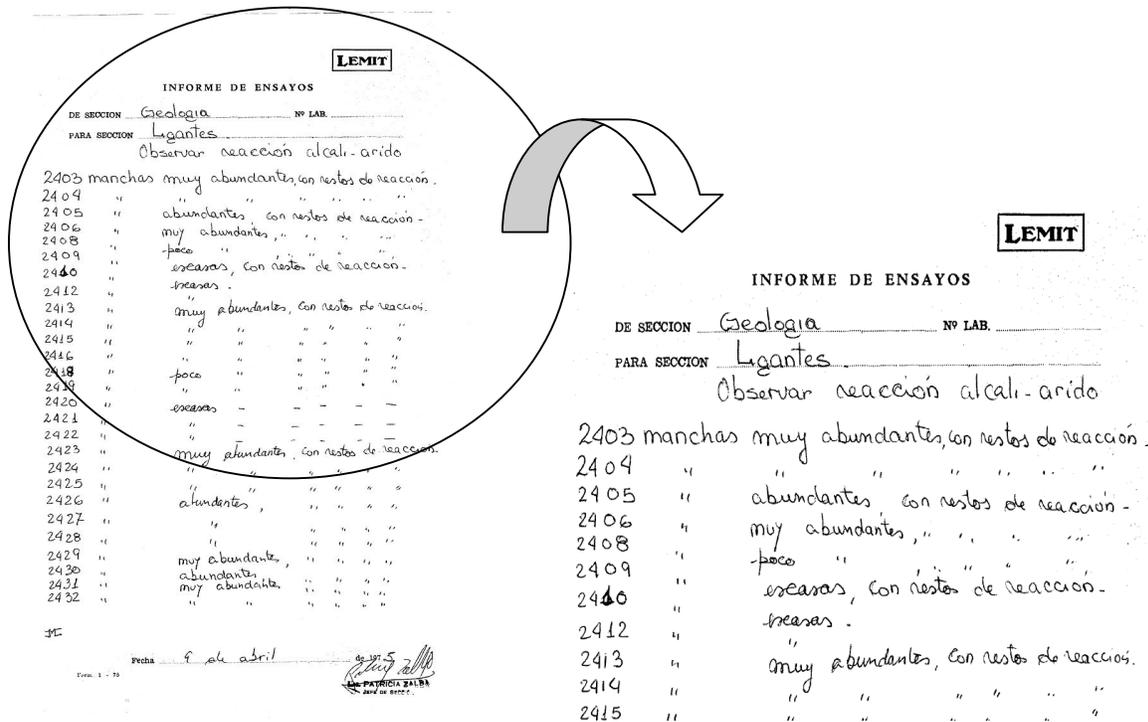


Figura 13. Facsímil de los estudios petrográficos de las barras de mortero al finalizar del ensayo

Entre los años 1985 y 1988 se realizaron estudios para determinar el efecto “pessimun” de una arenisca cementada con ópalos procedente de la Provincia del Chaco, caracterizada como muy reactiva. En la figura 14 se muestran los resultados obtenidos con dos cementos de alto álcalis, 1,22% y 1,14% respectivamente y una mezcla de arena no reactiva con porcentajes variables (5, 10, 30 y 50 %) de arenisca.

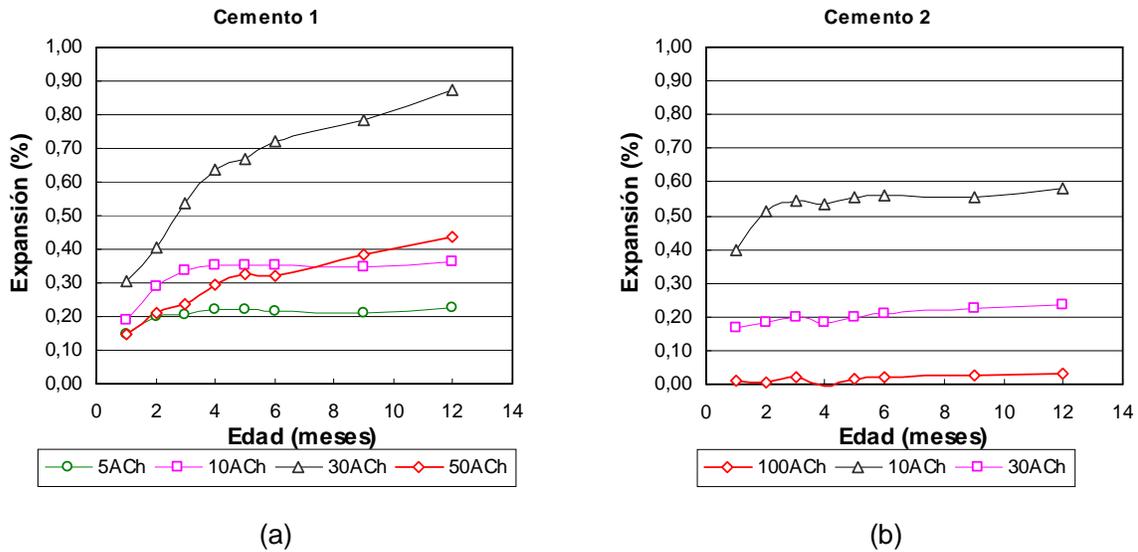


Figura 14. Evolución de la expansión de las mezclas de arena no reactiva y arenisca del Chaco en distintas proporciones utilizando cemento de alto contenido de álcalis (a) 1,22% y (b) 1,14%

Como se puede observar el porcentaje de arenisca para el cual se obtiene el efecto “*pessimun*” es distinto. Para el cemento 1 (Figura 14a), la máxima expansión se logra con el 30% de reemplazo de arenisca y mientras que para el cemento 2 (Figura 14b), ella ocurre con el 10% de agregado reactivo. Esta situación es atribuida a la variación del contenido de ópalo que cementa los granos en la arenisca o sea a la falta de homogeneidad de la muestra. Es de destacar que cuando los agregados son muy reactivos el método ofrece una buena respuesta y ya en los primeros meses se alcanza la expansión límite a un año. Una vez detectada la reactividad del agregado, es necesario buscar una solución tecnológica para disminuir o evitar la reacción deletérea. Para ello es usar cementos de bajo álcalis ($< 0,6 \text{ Na}_2\text{O}_e$), adiciones minerales activas inhibidoras de la RAS, cambiar parte o todo el agregado reactivo, etc.

En la figura 15 se muestran las experiencias para disminuir los efectos deletéreos de la mezcla *pessimun* utilizando el reemplazo de parte del cemento por ceniza volante o puzolana natural.

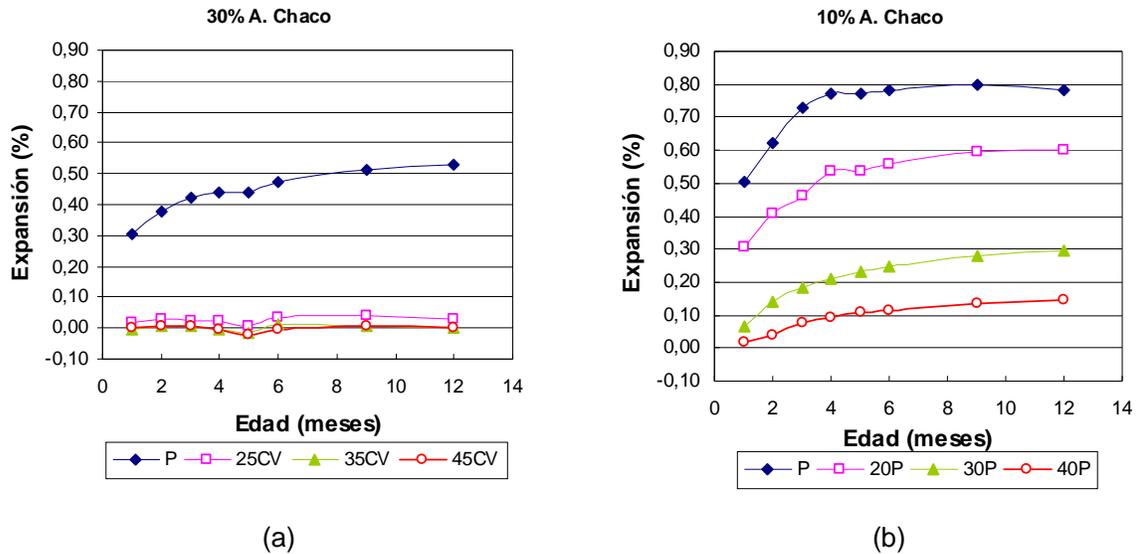


Figura 15. Evolución de la expansión de las mezclas de arena no reactiva y arenisca del Chaco con materiales suplementarios activos: (a) Mezcla con 30% de Arenisca del Chaco y porcentajes variables de ceniza volante. (b) Mezcla con 10% de Arenisca del Chaco y porcentajes variables de puzolana natural

Si se comparan las figuras 14 y 15 se puede observar la heterogeneidad de la arenisca. Cuando se obtuvo el efecto pessimum con el 10% de reemplazo (expansión de 0,58 %), al repetir el ensayo para estudiar el efecto inhibitor de la puzolana, con la mezcla patrón se obtuvo una expansión 35 % mayor (0,78 %), ocurriendo algo similar con el 30 % de reemplazo por arenisca.

En la figura 15a se puede observar el comportamiento inhibitor de la ceniza volante clase F cuando reemplaza el cemento, 25, 35 y 45%, para mitigar los efectos deletéreos de la RAS, ocasionado por el 30% de arenisca del Chaco y un cemento de alto álcalis. En la figura 15b se utilizó una puzolana natural procedente de Mendoza en reemplazo del 20, 30 y 40%, del cemento. Esta solución tecnológica fue deficiente dado que la expansión superó el límite especificado por la norma, utilizando en este caso un 10% de arenisca del Chaco. En la tabla 1 se informa el análisis químico de las adiciones minerales activas.

Tabla 1: Análisis químicos de las adiciones minerales activas

Determinación	Ceniza Volante (%)	Puzolana natural (%)
Pérdida x Calcinación	0,72	4,1
SO ₃	0,59	1,7
MgO	2,06	0,7
CaO	4,9	2,9
SiO ₂	59,6	70,4
Fe ₂ O ₃	6,9	5,2
Al ₂ O ₃	24,0	7,7
Na ₂ O	0,84	4,00
K ₂ O	0,31	3,26

A partir del año 1989, se mejoraron las condiciones de estacionamiento de las probetas, se reemplazaron los recipientes de almacenamiento mostrados en las figuras 5 y 6 por los especificados en versión actual de la norma IRAM 1637. Estos recipientes son de PVC con tapa de cierre hermético, sin pérdida de humedad y por lo tanto sin necesidad de control diario de los cierres hidráulicos. Sin embargo, en este tipo recipiente aún es difícil mantener la temperatura homogénea sobre la superficie de la barra de mortero, por lo que no se puede cortar totalmente el proceso de lixiviación.

En la figura 16 se indican los resultados para mezclas utilizando agregados de Bahía Blanca, muestreados en el año 1989, con un cemento de bajo álcalis (0,24%).

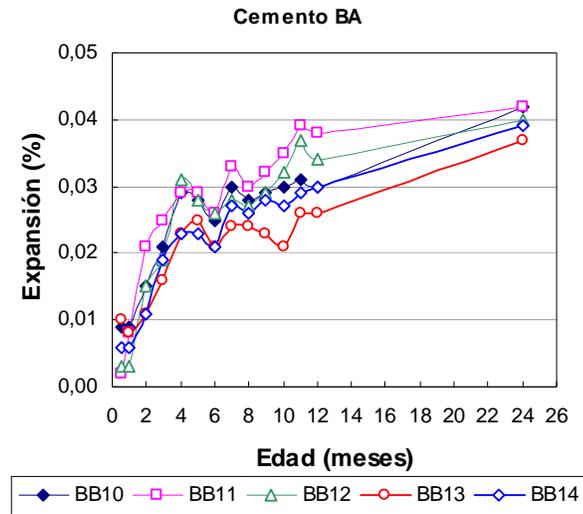


Figura 16. Expansión en los agregados de Bahía Blanca utilizando un cemento de bajo álcali

Como se puede observar en la figura, la expansión al término de dos años es menor que el límite especificado, por lo tanto la utilización del cemento de bajo álcalis, constituye en este caso una solución tecnológica para atenuar la RAS. Lo que se destaca en esta figura, en comparación con los ensayos realizados con anterioridad a 1989, es que los cambios de longitud son positivos, es decir se producen expansiones aunque no superen el valor para caracterizar a los agregados como reactivos frente a los álcalis. Por lo tanto las condiciones de exposición de las probetas mejoraron, logrando mantener la humedad en forma constante durante el transcurso del ensayo.

En las figura 17 se indican los resultados de ensayos realizados en el año 1996, con agregados basálticos y graníticos respectivamente.

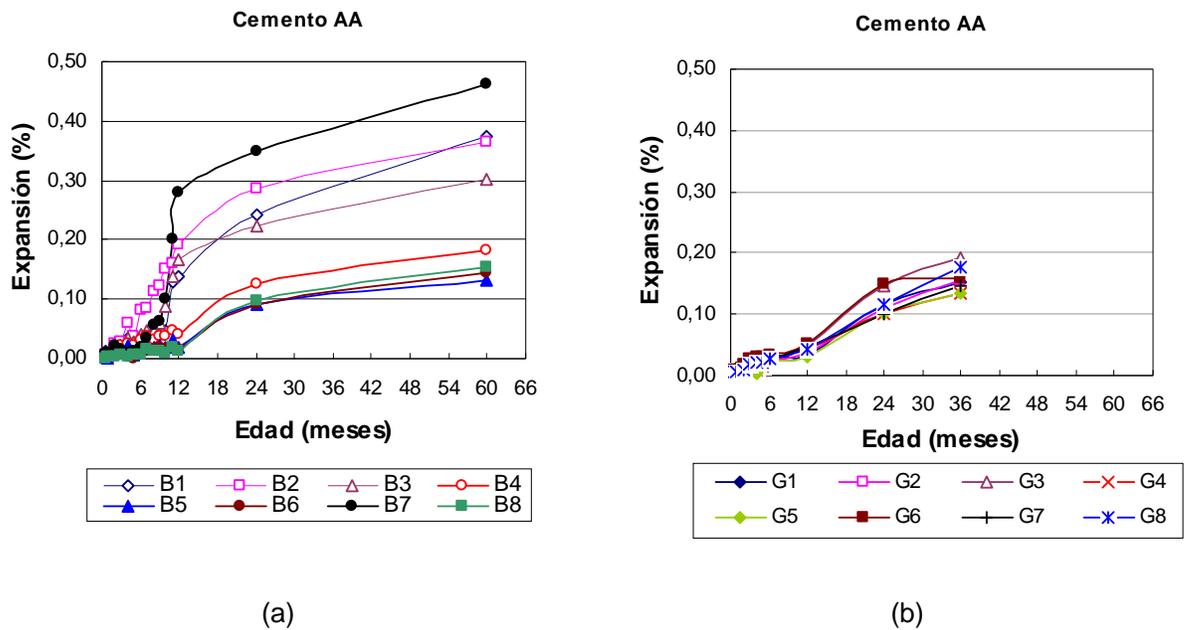


Figura 17. Evolución de la expansión de agregados (a) basálticos y (b) graníticos

Como se puede observar en la figura 17a un grupo de agregados basálticos no superan el límite de 0,10% al año y otro grupo sí, dependiendo del contenido de materiales reactivos presente en los agregados, principalmente vidrio volcánico y arcillas del grupos de las montmorillonitas.

Cuando el estudio se prolongó hasta 5 años, todos los agregados superaron el límite de 0,10%. Un comportamiento similar ocurre con los agregados graníticos que se muestra en la figura 17b. Estos resultados no sostienen la variabilidad de la medida atribuida a la lixiviación de los álcalis en el tiempo, pero si coinciden con el comportamiento de los agregados graníticos que son considerados como de reacción lenta.

A partir de esta fecha, los estudios de RAS realizados con el método según IRAM 1637 se realizan esporádicamente, pues comenzó a utilizarse en la evaluación el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674), debido a todos los inconvenientes citados anteriormente y al tiempo que demanda de un año. En la última década, este ensayo solamente se ha utilizado para evaluar el efecto *pessimun* cuando el agregado es muy reactivo y para pruebas de aditivos inhibidores.

2.2.- Método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 (ASTM C1260)

A principio del año 1988, se realizan las primeras experiencias con este método, conocido como NBRI. Las proporciones de los materiales en las mezclas se realizan de acuerdo a la norma ASTM C227. En esta oportunidad no se encontraba vigente la normativa nacional IRAM 1674, pues la misma se aprobó recién en 1997.

Estos primeros ensayos fueron realizados con agregados de distinta reactividad y procedencia. En la figura 18 se muestra la expansión de la experiencias realizadas usando 100% arenisca del Chaco (100ACh), otra con 100% de arena sílicea oriental (AO), una mezcla de arena *oriental* y 5% de ópalo (obtenido de árbol petrificado del sur del país) (5op) y una mezcla de arena oriental con el 30% de arenisca del Chaco (30ACh) y una tridimita (Tr), en combinación con un cemento de alto contenido de álcalis (1,14%).

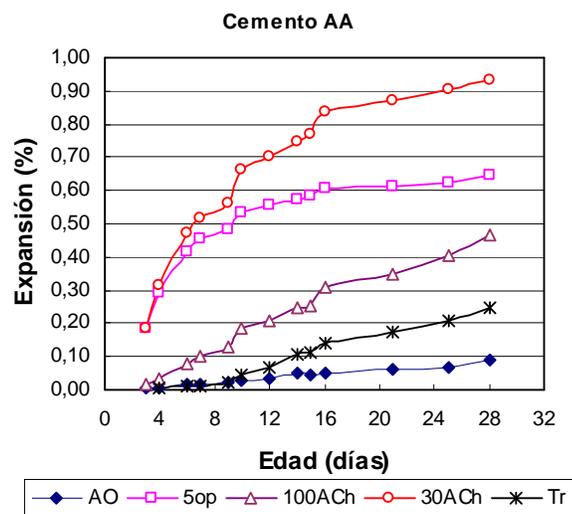


Figura 18. Expansión de agregados distinta reactividad obtenidos con el método acelerado de la barra de mortero

La evaluación con este método se realizó a los 16 días desde la elaboración de las probetas. Como se puede observar la arena oriental se caracteriza como no reactiva, pues la expansión fue inferior a 0,10%. La expansión de las mezclas con ópalo (5op) y arenisca del Chaco (30ACh) superan el límite de 0,20%, por lo tanto son consideradas reactivas y mientras que la expansión de la tridimita (Tr) está entre 0,10 y 0,20%, zona de incertidumbre del método. También se destaca que cuando se disminuyó el porcentaje de

arenisca del Chaco a un 30% (30ACh), la expansión se triplicó en referencia al mortero que contiene 100% de arenisca (100ACh), mostrando la importancia de contenido absoluto del material reactivo en relación con la evolución de la expansión, aunque no se puede afirmar que este 30% corresponda al *pessimun* porque se ensayaron únicamente dos porcentajes.

En la figura 19 se muestran los resultados de la expansión en las barras de mortero elaboradas con los agregados utilizados en la obra del dique Piedra del Aguila (rodados patagónicos con presencia de rocas volcánica con vidrio), con distintos cementos: AA-alto álcalis (0,97%), BA-bajo álcalis (0,57%), Puz-puzolánico comercial y otro preparado en laboratorio (AA27Puz) por combinación del cemento portland de alto álcalis con un reemplazo del 27% por puzolana natural.

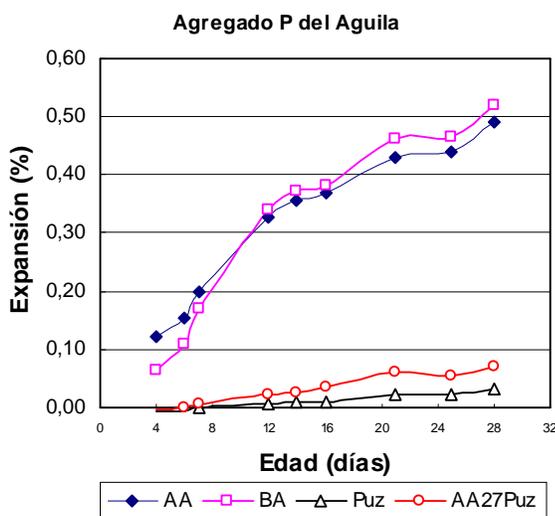


Figura 19. Expansión de los agregados utilizados en el dique Piedra del Aguila con distintos cementos

Este agregado se caracteriza como reactivo cuando se lo combina con ambos cementos portland de alto y bajo álcali, ya que superan ampliamente el límite de expansión a los 16 días. El método de ensayo resulta no adecuado para evaluar la utilización de un cemento de bajo álcalis como solución tecnológica de la RAS. El aporte de álcalis del medio circundante, pues la probetas de ensayos están inmersas en una solución de NaOH, provoca una evolución de la expansión del cemento de bajo álcalis

(BA) similar a la curva de expansión del mortero con cemento de alto álcalis (AA). Por el contrario, este método resulta apropiado para evaluar las soluciones tecnológicas utilizando adiciones minerales; en este caso la efectividad de la adición de una puzolana natural con cemento de alto álcali, o de un cemento puzolánico comercial.

A mediados del año 1992, se ensayaron arenas finas y gruesas, procedentes de Barranqueras, Provincia del Chaco. Se utilizaron dos cementos normales CPN1 y CPN2 con un contenido de álcalis de 1,16 y 0,50 %, respectivamente, y dos cementos puzolánicos CPP1 y CPP2 de procedencia argentina y paraguaya. En las figura 20 se muestran los resultados de la expansión.

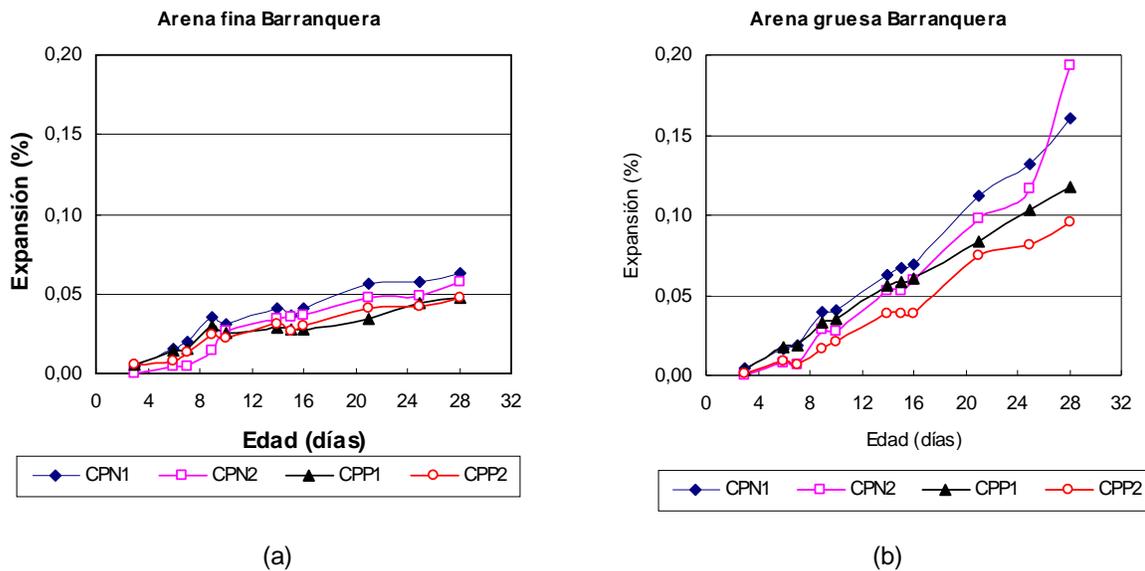


Figura 20. Expansión de arenas fina y gruesa de Barranqueras (Chaco) en combinación con cemento portland y puzolánicos

Como se puede observar tanto la arena fina como la arena gruesa, no superan el límite de 0,10% a los 16 días y se consideran como no reactivas. Este es un ejemplo que indica que con el método catalogado como riguroso por las condiciones de exposición (solución de NaOH 1N a 80 °C), no se obtuvieron valores de expansión superiores al límite, con lo cual el proceso expansivo depende de la mineralogía de los agregados estudiados y no de las condiciones de exposición.

En el año 1993 se realizaron estudios con un agregado granítico procedente de Tandil y una combinación con 50% de arena oriental. En las experiencias se utilizó un cemento de alto álcalis (1,16%) y otro de bajo álcalis (0,42 %). En la figura 21 se muestra los resultados obtenidos. En ella se observa que el agregado granítico es reactivo, pues alcanza el valor de 0,20% de expansión; cuando se disminuye la concentración de agregado reactivo utilizando arena oriental en un 50%, la expansión disminuye pero la mezcla sigue siendo considerada como reactiva, por lo tanto puede inferirse que con este tipo de agregados graníticos no existe el efecto *pessimun*. Como solución tecnológica para atenuar la reacción se utilizó un cemento de bajo álcalis, pero en la figura se observa que la expansión no disminuyó y por el contrario aumentó. En concordancia con lo descripto previamente, este método de ensayo no es apto para evaluar la utilización de un cemento de bajo álcali como solución tecnológica.

En la figura 22 se muestra las experiencias realizadas con el cemento de alto (1,16 %) álcali y de bajo álcali (0,30 %) combinados con un basalto de Córdoba y un canto rodado proveniente del Departamento de Salto (Uruguay) que se consideran no reactivos. En ambos casos, la expansión obtenida es menor que el límite, y presentaron una evolución similar con los dos cementos.

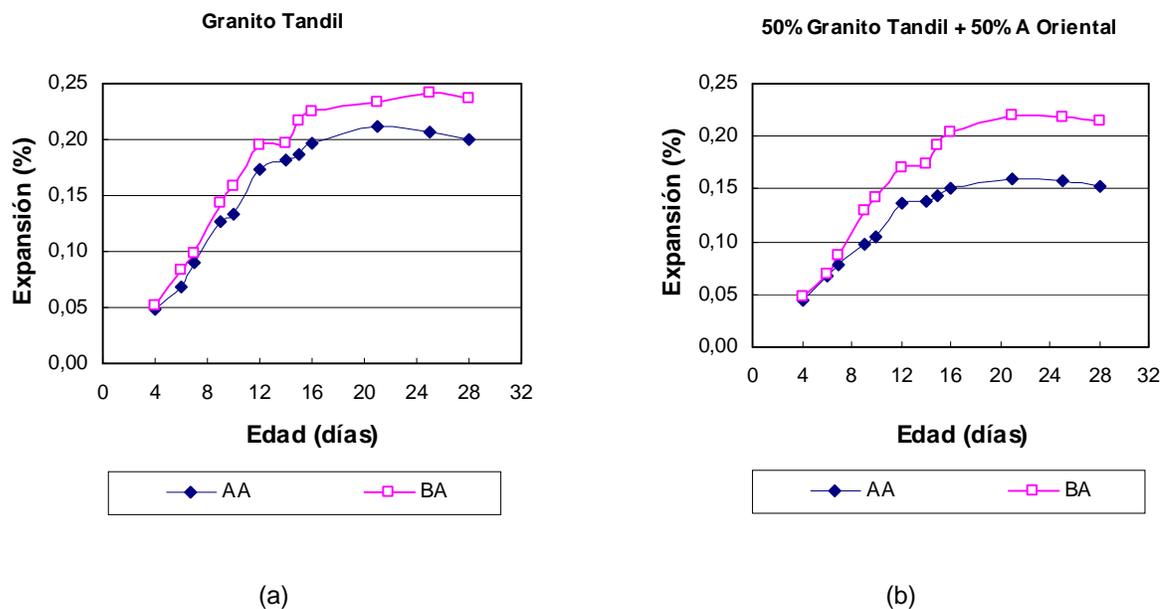


Figura 21. Expansión de (a) granito y (b) mezcla 50% granito + 50% arena oriental con cemento de bajo y alto álcalis

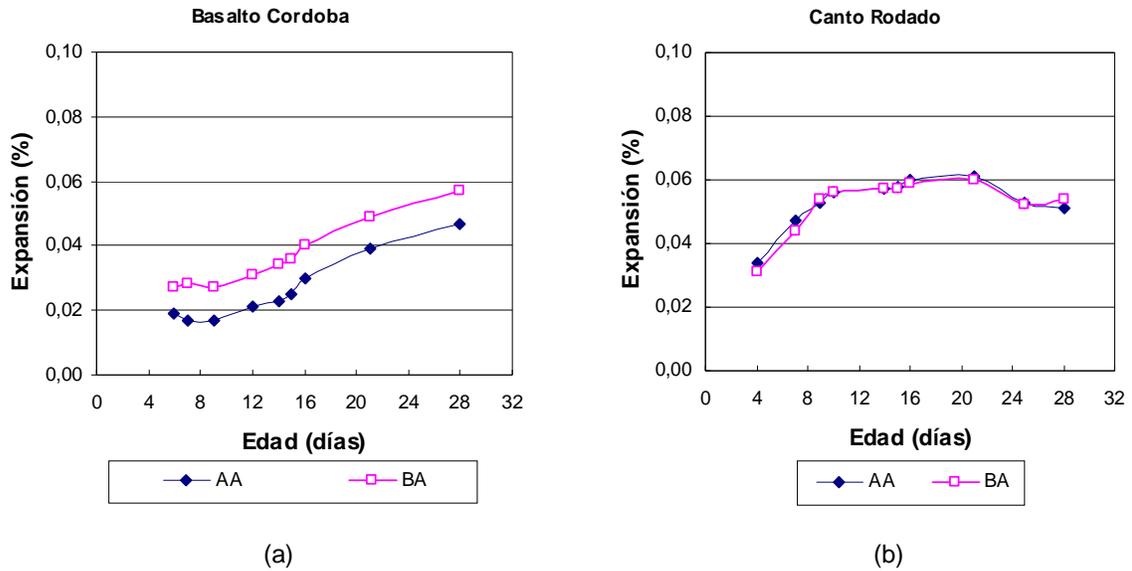


Figura 22. Expansión de (a) basalto y (b) canto rodado con cemento de bajo y alto álcalis

En 1995, las experiencias estuvieron orientadas a evaluar la inhibición de la expansión de agregados reactivos por el uso de adiciones minerales activas. En estas experiencias se utilizó un granito procedente de Azul y una mezcla de arena oriental con un reemplazo del 5% por arenisca del Chaco. Las adiciones minerales estudiadas fueron escoria granulada de alto horno (E), filler calcáreo (C), ceniza volante (CV) y puzolana natural (Puz). Las mismas se utilizaron en distintos porcentajes de reemplazo del cemento portland de alto álcali.

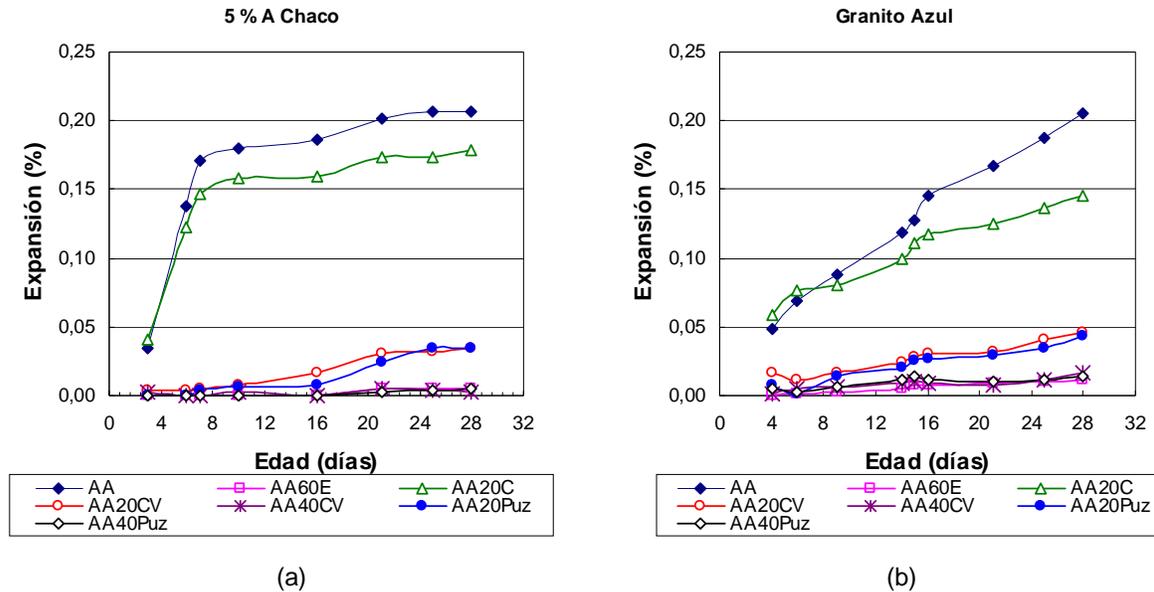


Figura 23. Efecto de reemplazo del cemento portland de alto álcali por distintas adiciones minerales en la expansión de (a) arena oriental con 5% de arenisca del Chaco y (b) granito

En la figura 23 se informan los resultados obtenidos que indican que ambos agregados son considerados reactivos ya que la expansión fue superior a 0,15% a los 16 días. La incorporación de 20% de ceniza volante o puzolana natural redujo a menos de 0,05 %, mientras que reemplazos del 40% de ceniza volante o puzolana natural, o 60% de escoria se logró atenuar totalmente la expansión provocada por la RAS. Cuando se utilizó 20% de filler calcáreo, la expansión se redujo en una muy baja proporción, y por lo tanto esta adición mineral no resulta eficaz para inhibir la RAS. Estos resultados confirman que el método de ensayo es apto para evaluar el tipo y porcentaje de adición mineral activa necesaria para ser considerada una solución tecnológica que inhibe la RAS.

En la figura 24 se muestra los resultados de ensayos con agregados graníticos de la Provincia de Buenos Aires, procedentes de Tandil, Olavarría y Azul. Están agrupados en función de los valores de expansión. Se utilizó un cemento CPN de alto álcalis (1,16 % de Na_2O_e).

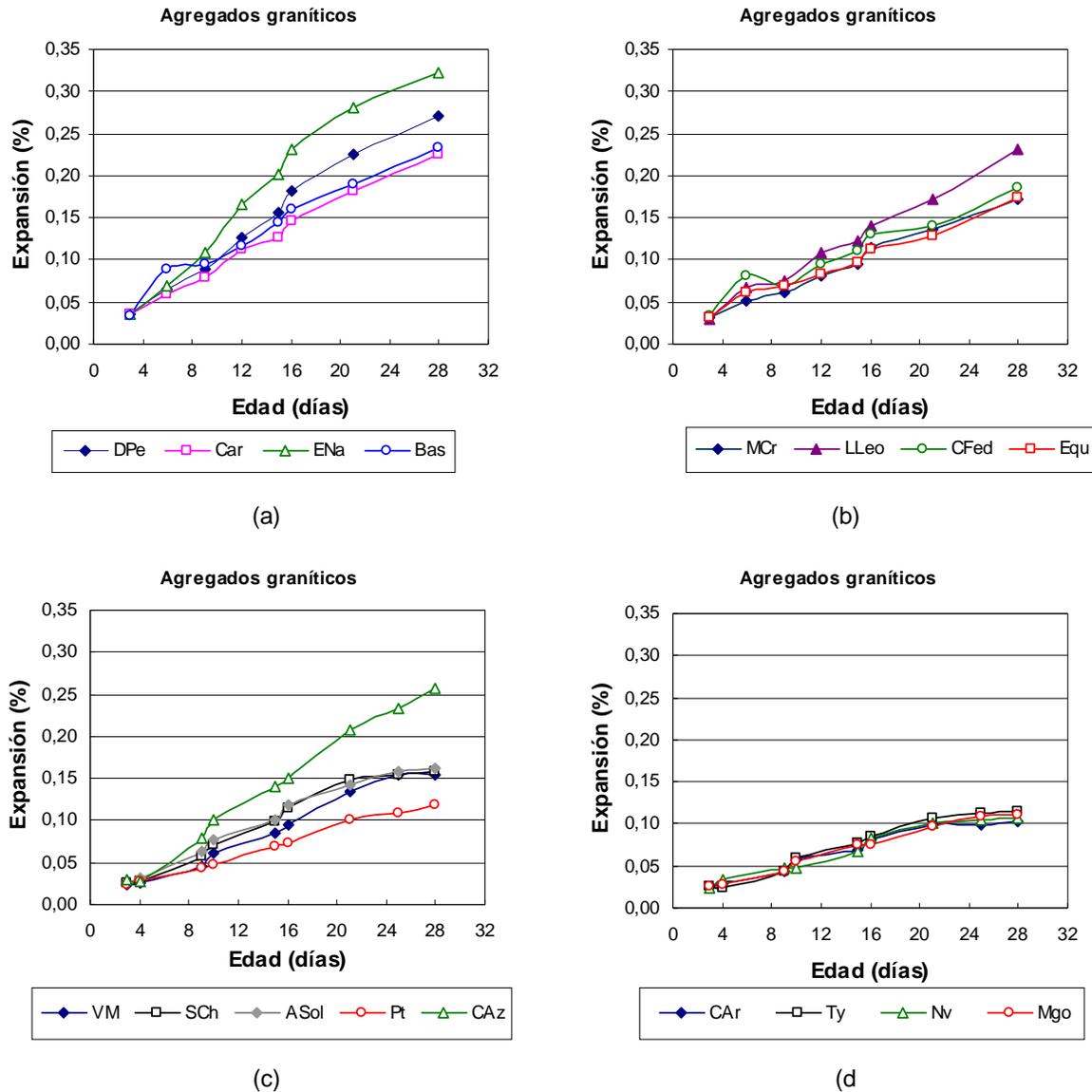


Figura 24. Expansión obtenida en ensayo IRAM 1674 para: a y b) granitos de Tandil; c y d) granitos de Olavarría y Azul.

Los agregados graníticos tienen en su composición mineralógica un porcentaje de cuarzo entre 30 a 33%, el resto está constituido por feldespatos (potásico y plagioclasa) en porcentajes similares al cuarzo y además micas y algún mafito. La reactividad de los agregados está vinculada con el grado de recristalización del cuarzo y la deformación de los mismos dependiendo si han sufrido procesos metamórficos. Por lo general este tipo de agregados se los considera de reacción lenta, debido precisamente al tiempo que demanda la reacción química para producir manifestaciones deletéreas de RAS en el

hormigón. También hay granitos que tienen cuarzo sin deformar o con ángulo de extinción ondulante muy bajo y el comportamiento es inocuo frente a la RAS. Los agregados graníticos de la figura 24a presentan la mayor expansión a los 16 días (0,15 y 0,20%), mientras que los informados en la figura 24b, superan el límite de 0,10% pero son menores a 0,15%. Los granitos de Olavarría y Azul (Figura 24c y d) presentan agregados que se encuentran en la misma situación y para otros la expansión es menor que 0,10%. Para este método de ensayo, se considera que el agregado es reactivo cuando la expansión supera el valor de 0,20%. La mayoría de los agregados con esta mineralogía producen expansiones intermedia (0,10 a 0,15%), que no permite definir con exactitud si los mismos son reactivos. Para este tipo de agregado, el método de ensayo presenta alguna incertidumbre para discernir la reactividad de este tipo de agregados. La interpretación de los resultados del ensayo con agregados de reacción lenta requiere modificar los límites de expansión o la edad de ensayo, pero aun no se ha obtenido una definición categórica sobre este ítem.

En 1997, el método de ensayo se normalizó en Argentina según la norma IRAM 1674. El cambio más sustancial que presentó la norma fue fijar la cantidad de agua de mezclado y así determinar una razón a/c constante igual a 0,47, también indicado por norma ASTM C1260. Con anterioridad, el mortero se preparaba con la cantidad de agua de mezclado necesaria para obtener una fluidez entre 105 a 120 %, de acuerdo a la normativa ASTM C227. El cambio introducido fue evaluado en dos series de morteros elaborados unos con fluidez constante y otros con razón a/c contante (0,47). El agregado de referencia fue mezcla de arena oriental con 5, 10 y 20% de arenisca del Chaco. Todas las mezclas se hicieron por duplicado y en la figura 25 se informa el valor promedio de la expansión para las distintas mezclas de agregados analizados.

Del análisis de los resultados se puede observar que la evolución de la expansión con una u otra alternativa son similares, con una variación del 10 ± 5 % que con estos niveles de expansión, superior a 0,35%, no modifica la clasificación de los agregados utilizados. En el ensayo, existe una tendencia a disminuir la expansión cuando se utiliza el mortero de razón a/c constante y tiene la ventaja de eliminar la influencia de la cantidad de agua en la mezcla para obtener una fluidez constante.

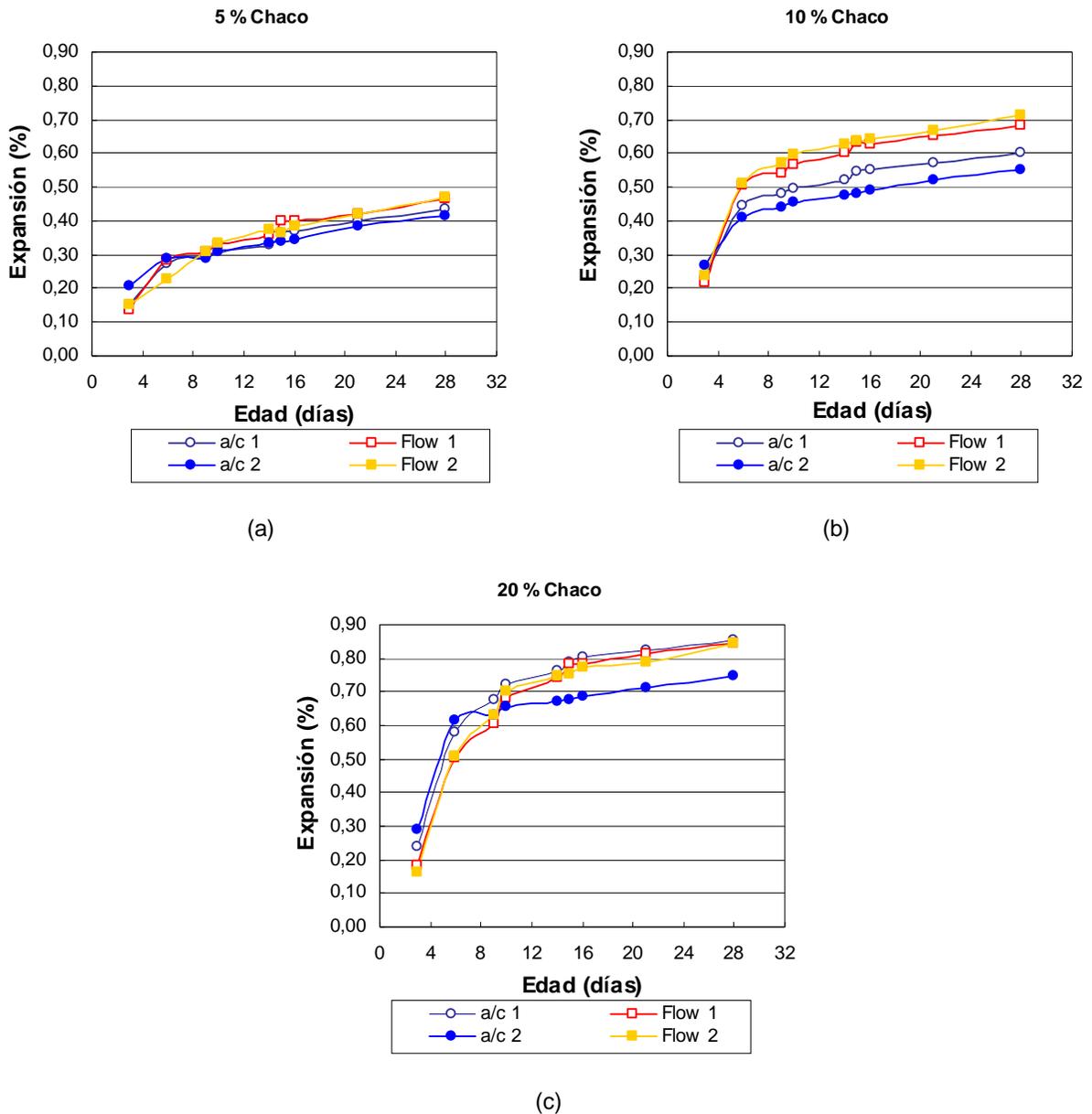


Figura 25. Análisis comparativo de la expansión obtenida en morteros elaborados con igual razón a/c o igual fluidez para la mezcla de arena oriental con (a) 5%, (b) 10% y 20% de arenisca del Chaco

A partir de esta fecha y hasta la actualidad, los ensayos se realizaron con la metodología especificada por IRAM 1674. A partir del año 2003, a pedido de las empresas constructoras para ciertas obras, se comenzó a realizar el ensayo acelerado de

la barra de mortero utilizando una mezcla con las proporciones de materiales indicadas en las dosificaciones que se proponen para las obras. En esta mezcla se mantienen las cantidades de materiales (cemento, agua y agregados) propuesto en la norma; pero los agregados se colocan en las proporciones relativas utilizadas en la obra. Los resultados obtenidos permiten establecer si la mezcla cumple o no con los requisitos de expansión propuestos por el Reglamento CIRSOC 201-2005 (expansión $< 0,10\%$ a los 16 días).

En la figura 26 se muestra los resultados obtenidos para un conjunto de materiales de obra. Las mezclas M1 a M4 corresponden a canto rodados del Río Diamante (Mendoza) con arenas del río Paraná y la mezcla M5 corresponde a un basalto de Paraguay. En primer lugar, la figura 26a muestra los resultados de un conjunto de agregados en distintas proporciones utilizando un cemento de alto horno (CAH) para atenuar la RAS, mientras que la figura 26b muestra para un conjunto de agregados el cambio de cemento por CPC. Las cuatro mezclas cumplen con los requisitos propuestos por el Reglamento CIRSOC 201. Estos resultados son válidos para el conjunto de materiales estudiados y en las proporciones indicadas. Los resultados no se pueden generalizar y aplicar para otra partida de materiales aunque la procedencia sea la misma. Es recomendable realizar ensayos periódicos para verificar el cumplimiento de las especificaciones.

Las figuras 26c y 26d muestran los resultados de la expansión de una proporción de obra, utilizando distintos cementos para disminuir los efectos deletéreos de la RAS. Los morteros con cemento AA y CPN superan el límite propuesto de $0,10\%$, por lo que la mezcla no resulta apta para ser usada.

Desde 1988, cuando comienza a utilizarse el método propuesto por NBRI, hasta la actualidad el método ha variado en diferentes aspectos tales como la cantidad de agua de mezclado, la verificación del tipo y proporción de adiciones minerales activas capaces de inhibir la RAS, y la verificación del conjunto de materiales en las proporciones de la mezcla de obras para verificar su comportamiento frente a la RAS.

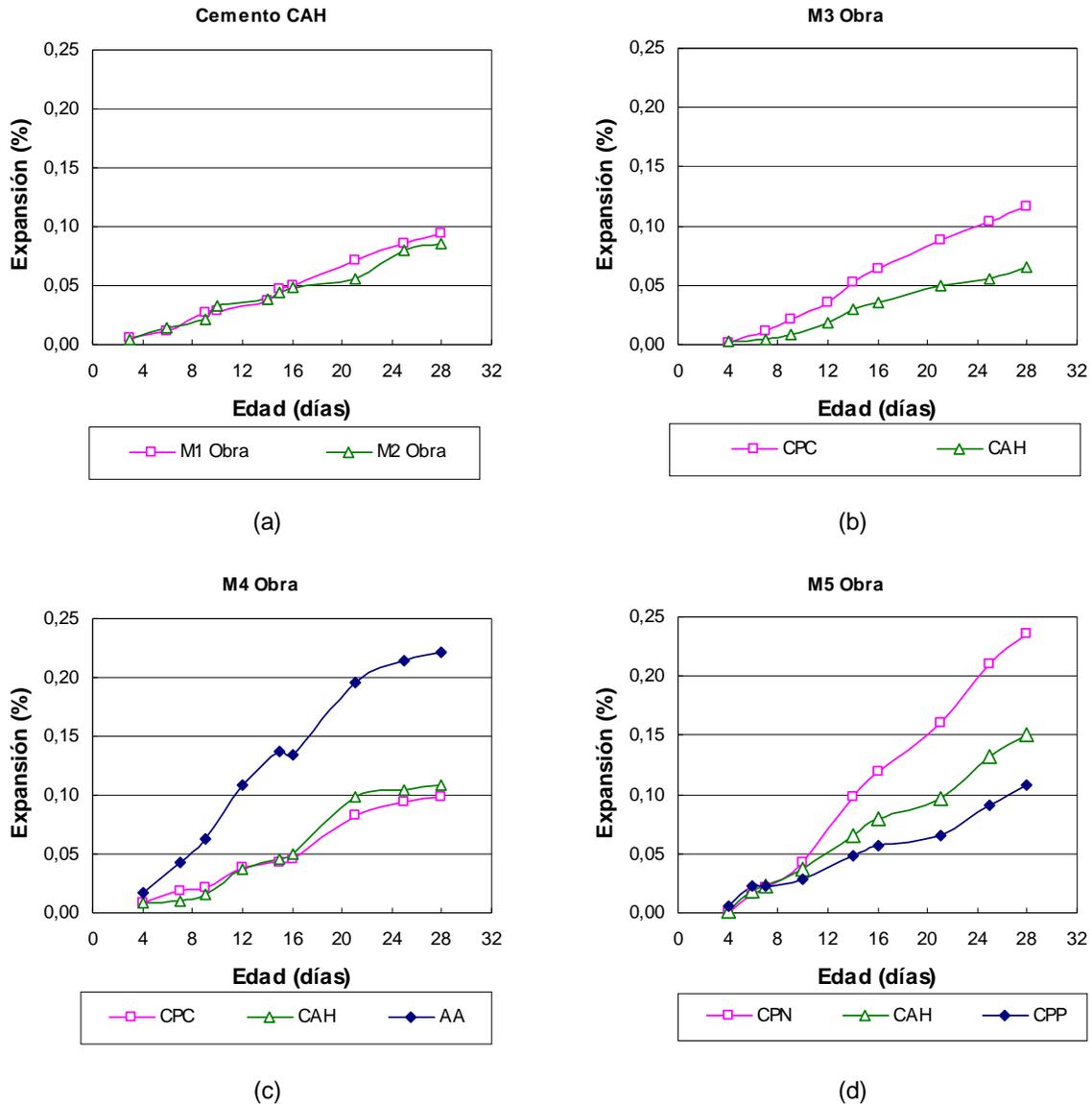


Figura 26. Análisis comparativo de la expansión obtenida en morteros elaborados con materiales de obra (a) dos proporciones de agregados de obra, (b), (c) y (d) capacidad inhibitoria de distintos cementos para un conjunto de agregados de obra.

2.3.- Método del prisma de hormigón IRAM 1700 (ASTM C1293)

Los primeros estudios realizados en el LEMIT con prismas de hormigón datan de mediados de la década de 1980. En un principio se siguió los lineamientos de la norma canadiense CSA-A23-14A, en cuyo texto especificaba un contenido unitario de cemento de 310 kg/m³. Las primeras experiencias se realizaron con agregados cuarzo líticos

procedentes de Allen y Mainqué Provincia de Río Negro y distintos tipos de cementos, puzolánico y normales con contenidos variados de álcalis (1,14 y 0,24) y por último el normal de alto álcalis combinado con una puzolana de Mendoza. Se utilizaron dos temperaturas de curado: en la cámara de almacenamiento a 38 °C y otra en cámara húmeda a 22 °C. En la figura 27 se muestra los resultados obtenidos.

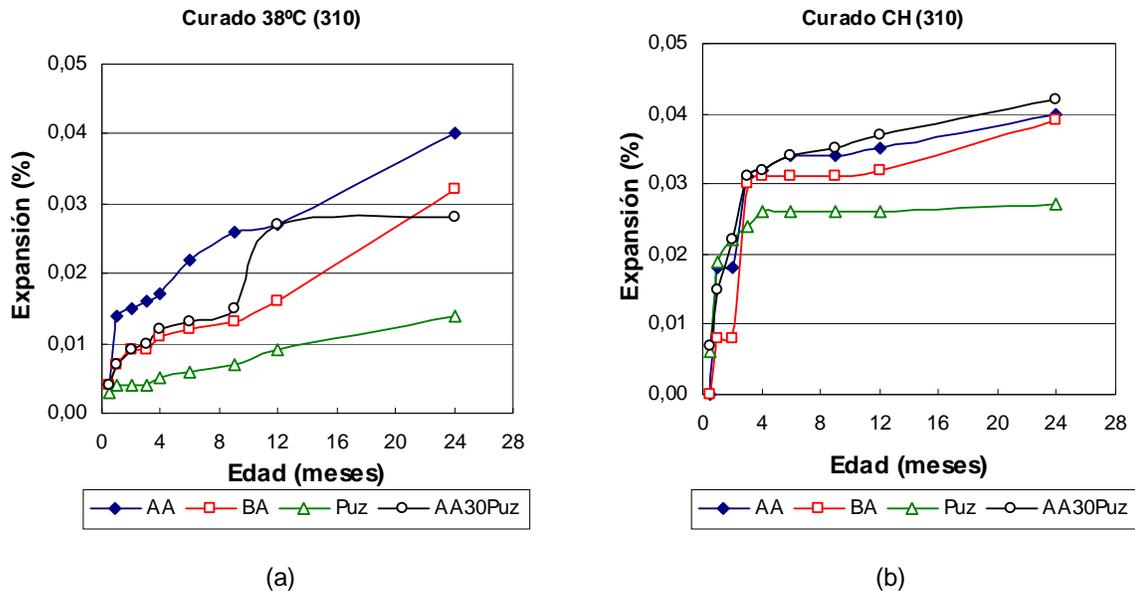


Figura 27. Expansión obtenida en prismas de hormigón (310 kg/m³) curados durante dos años en (a) Cámara de almacenamiento a 38 °C y (b) Curado en cámara húmeda a 21 °C

Se puede observar que al término de dos años los valores de expansión están en el límite propuesto por las especificaciones (0,040 %), principalmente para el curado en cámara húmeda con excepción de la mezcla con cemento puzolánico. En cambio, la expansión fue menor cuando el curado se realizó a 38 °C, no coincidiendo con la lógica de las reacciones químicas. Para estos grupos de materiales, la diferencia más destacada se encuentra en la cinética de la reacción, que presenta una elevada tasa a primeras edades para el curado en cámara húmeda. De acuerdo a la bibliografía [8], algunos agregados, como la arcilita y las grauvacas, que habían manifestado reactividad en obra, al término de un año daban valores de expansiones inferiores al límite de 0,040 %. Esta diferencia dio origen a nuevas pruebas del método, que finalmente derivaron en un incremento del contenido unitario de cemento a 420 kg/m³, que caracterizaba a estos agregados como reactivos. Con esta modificación de la normativa, se realizaron nuevas experiencias en el LEMIT para comparar la expansión de los prismas hormigones curados

a 38 °C y aquellos curados en cámara húmeda. Para este propósito se utilizaron agregados provenientes de Buenos Aires, Córdoba y Tucumán con una combinación de dos cementos de alto álcalis (1,16 y 1,34%). En la figura 28 se muestra la evolución de la expansión hasta los 3 años para dos grupos de agregados.

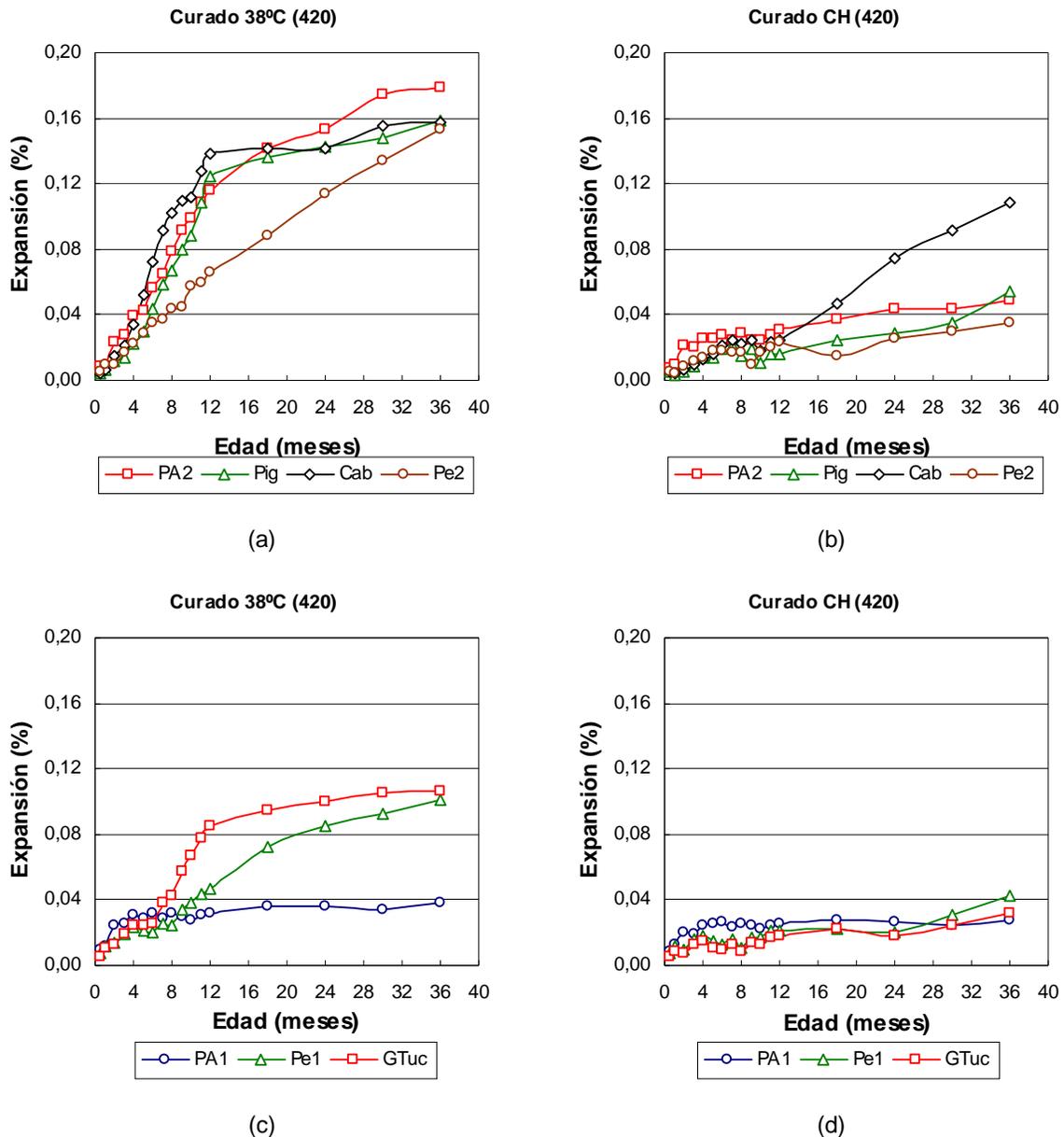


Figura 28. Expansión obtenida en prismas de hormigón (420 kg/m³) curados durante tres años en (a y c) Cámara de almacenamiento a 38 °C y (b y d) Curado en cámara húmeda a 21 °C

Para el primer grupo de agregados, la curva de expansión (Figura 28a y 28b) muestra una mayor tasa para los prismas almacenados a 38 °C que aquellos

almacenados a 21 °C. Este comportamiento es atribuido a una mayor velocidad de reacción debido a la mayor temperatura de estacionamiento. El análisis también muestra que los prismas curados a 38 °C superan el límite en menos de 12 meses, mientras que los prismas curados en cámara húmeda superan el límite en el término 18 a 36 meses.

Los agregados de menor reactividad (ver Figuras 28c y 28d) muestran un comportamiento similar. A 38 °C, dos de los agregados superan el límite antes de los 12 meses, mientras que a 21 °C dichos agregados presentan una expansión igual o menor al límite a 36 meses. Los resultados de estas experiencias coinciden con la información bibliográfica [8] y también indican que para que se produzca la RAS, no es necesaria la temperatura elevada, ya que la reacción puede ocurrir a menor temperatura ambiente con una menor tasa de progreso.

Una vez definido el contenido unitario de cemento y la temperatura más adecuada para el ensayo del prisma de hormigón, los estudios se encaminaron a determinadas variables en el proceso de tratamiento de las probetas durante el estacionamiento. Según la normativa canadiense (CSA A23 14A) y americana (ASTM C1293), las probetas de hormigón se colocan dentro del recipiente de almacenamiento sin ningún tratamiento previo, es decir se colocan “*desnudas*”. En el recipiente se coloca un papel secante alrededor de sus paredes que se lo denomina “*mecha*”, identificados en estos estudios con la letra “m”. La normativa europea (RILEM AAR-3) y argentina (IRAM 1700) realizan un acondicionamiento previo de las probetas, que consiste en envolverlas con una tela de algodón saturada en agua, luego se coloca un film de polietileno y finalmente se colocan dentro de una bolsa plástica cerrada herméticamente, identificado en estos estudios con la letra “t”.

Para el estudio de la incidencia del proceso de tratamiento de las probetas durante el estacionamiento, se utilizaron hormigones elaborados con tres agregados de distintas procedencia y mineralogía: una arenisca del Chaco, una arena de cuarzo lítica de Río Negro y un agregado granítico de Tandil. En la figura 29 se informan los resultados de la expansión obtenida para ambos procesos. Para los agregados de mayor reactividad (arenisca del Chaco y arena de cuarzo lítica), la diferencia en la evolución de la expansión es significativa, y los prismas curados con tela son los que presentan mayor expansión.

En cambio para el agregado granítico, la expansión fue similar para ambos procesos de almacenamiento. Este comportamiento puede atribuirse a que el acondicionamiento con tela mantiene mejor la humedad del prisma y evita el lavado de los álcalis en la superficie del hormigón por la recirculación de la humedad en el recipiente de almacenamiento.

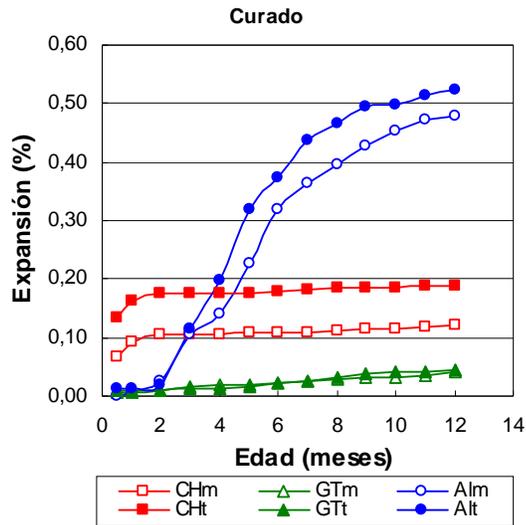


Figura 29. Evolución de la expansión de prismas hormigón elaborados con tres tipos de agregados en los que las probetas fueron acondicionadas para su mantenimiento envuelto en tela (t) o desnudas (m)

En la figura 30 se muestra la reproducibilidad del método de ensayo para el mismo agregado granítico, realizado en dos fechas distintas. Se puede observar que las curvas son prácticamente coincidentes, lo cual demuestra la confianza del método para evaluar la reactividad potencial de los agregados.

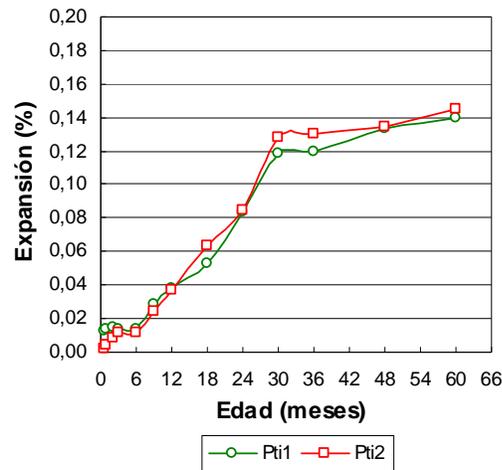


Figura 30. Reproducibilidad del ensayo del prisma de hormigón

También se estudiaron con agregados graníticos procedentes de Azul, Tandil y Olavarría, los cuales poseen distinto grado de reactividad en función del grado de deformación y/o tensión y del proceso de recristalización del cuarzo. En la figura 31 se muestra los resultados obtenidos para estos agregados mostrando cuales son clasificados como reactivos y no reactivos.

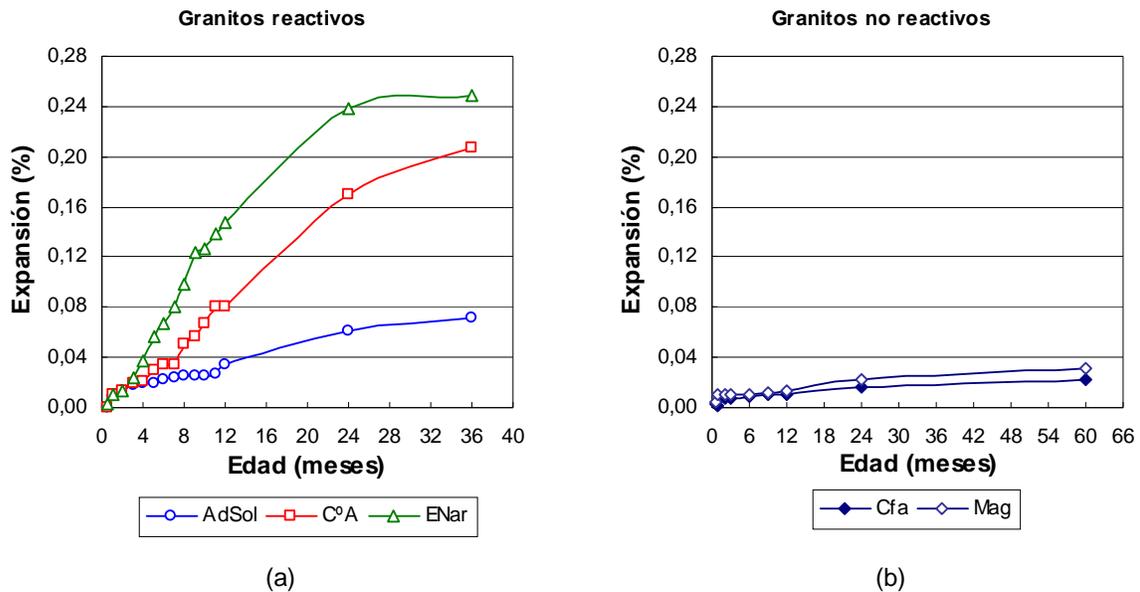


Figura 31. Evolución de la expansión en prismas de hormigón de los granitos procedentes de la provincia de Buenos Aires: (a) granitos reactivos a 36 meses y (b) granitos no reactivos a 60 meses

Las experiencias realizadas durante este período permitieron la puesta a punto del método de ensayo y determinar el grado de confianza para clasificar la reactividad potencial de los agregados. A partir de este momento, los estudios se focalizaron en probar las distintas soluciones tecnológicas que permitan inhibir o mitigar los efectos deletéreos de la RAS.

En primer lugar se estudió el uso de un cemento de bajo álcali y la incorporación de adiciones minerales activas. Para el estudio se utilizó un agregado granítico reactivo, procedente de Azul, cemento portland de alto álcalis (1,13%), una ceniza volante y una puzolana natural procedente de Mendoza. Adicionalmente se utilizó un cemento de bajo contenido de álcalis (0,34 %). Los porcentajes de reemplazo del cemento de alto álcali por las adiciones en estudio fueron de 5, 20 y 40% en peso. En la figura 32 se muestra los resultados de la expansión de los hormigones con ceniza volante y con puzolana natural hasta los 24 meses. El 20 y 40% de reemplazo de ambas adiciones por el cemento de alto álcalis, provocan una significativa reducción de la expansión, y el comportamiento es similar al de un cemento de bajo contenido de álcalis. Para el 5% de reemplazo, la expansión disminuyó para ambas adiciones pero su valor resultó superior al límite considerado como inapropiado para inhibir la reacción.

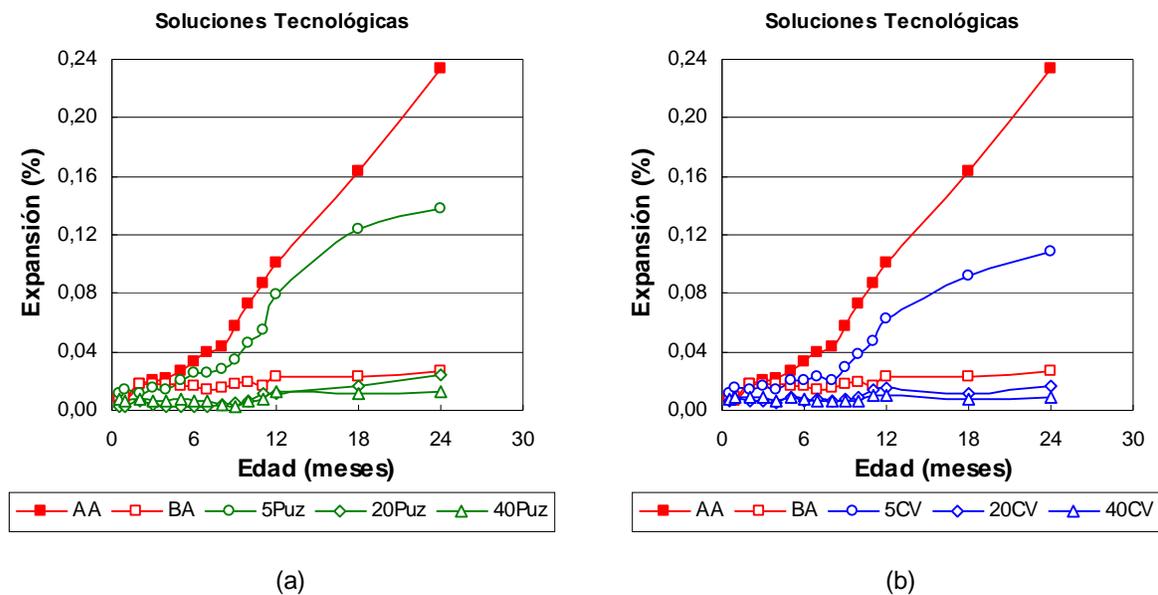


Figura 32. Evolución de la expansión en prismas de hormigón con granitos reactivos y cemento de alto álcali con reemplazo por: (a) puzolana natural y (b) ceniza volante

Otras experiencias para inhibir o atenuar los efectos deletéreos se realizaron con agregados graníticos reactivos y se aplicaron soluciones a base de sales de litio. Las primeras experiencias se realizaron a fines de 1997 (granito de Azul) y las últimas a mediados de 2004 (granito de Tandil). Los resultados se muestran en la figura 33, donde se observa que las soluciones tecnológicas basadas en sales de litio (nitratos) reducen significativamente la expansión cuando se utilizan agregados graníticos y permiten mitigar los efectos deletéreos de la RAS en el tiempo. No obstante se requiere de mayor información sobre la efectividad de esta solución en agregados de diferente mineralogía. La dosis del 100% corresponde a la recomendada por el fabricante incrementando a 1,15 y 1,30 veces dicha dosis se obtendrán las denominadas 115% y 130% en la figura 31 respectivamente. Para el conjunto de materiales de una obra se debe estudiar la solución empleando las proporciones del hormigón en estudio.

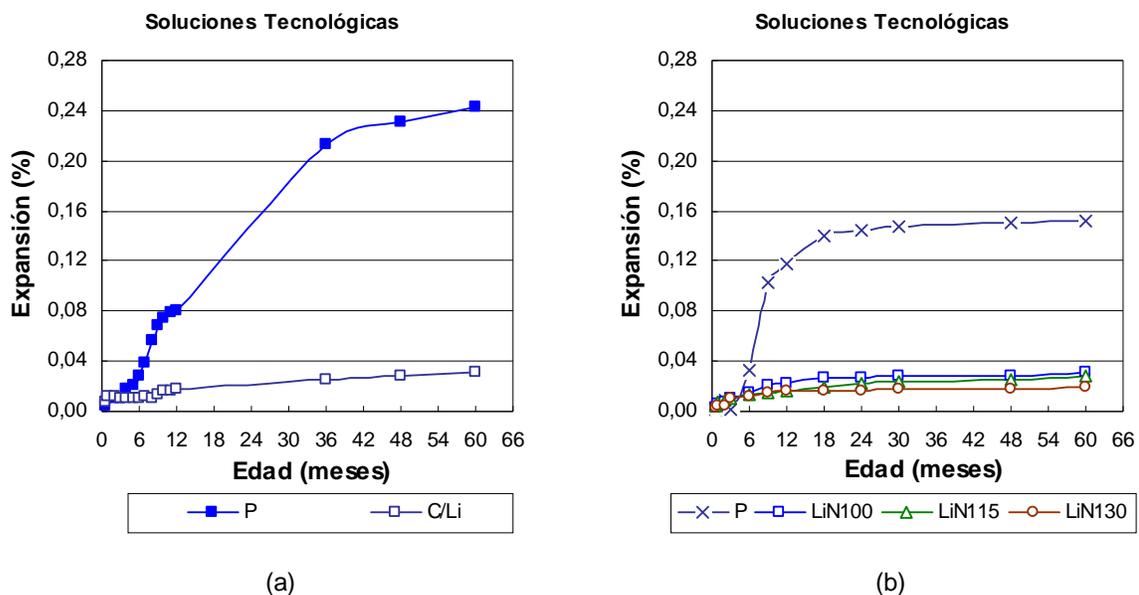


Figura 33. Evolución de la expansión en prismas de hormigón con granitos reactivos y inhibidores en base a sales de litio: (a) granito de Azul y dosis de 130% de litio y (b) granito de Tandil y dosis de 100, 115 y 130 % de litio.

3.- OTROS ENSAYOS

Complementariamente a las experiencias realizadas siguiendo la metodología de ensayos normalizados descriptas anteriormente, se realizaron estudios en el LEMIT con

metodologías propuestas por otros autores. Entre ellos se pueden citar los propuestos por Scott y Duggan [9], Hudec y Larbi [10], el método de las celdas osmóticas por Schmitt y Stark [11]. Estos estudios fueron realizados entre 1986 y 1991.

Además, es interesante destacar que se participó en estudios interlaboratorios para la normalización del método RILEM AAR-4, método acelerado del prisma de hormigón curado a 60 °C, con la participación de aproximadamente 20 laboratorios de varios países del mundo a mediados de 2002. Estas experiencias continuaron y a partir del 2007 hasta la actualidad se están realizando los ensayos de manera sistemática con el fin de lograr la normalización en Argentina.

4.- CONCLUSIONES

En este capítulo se recopilaron los resultados de los ensayos más importantes realizados en el LEMIT desde 1965 y se analizaron con una perspectiva histórica de la normativa los distintos métodos de ensayos utilizados para reinterpretar sus resultados. La principales conclusiones de este estudio retrospectivo sobre cada método de ensayo normalizado son:

Método de la barra de mortero, IRAM 1637:

Este método de ensayo comenzó a utilizarse a fines de la década de 1950, hasta fines de la década de 1990 en que sus resultados fueron perdiendo credibilidad por diferentes razones:

- El tiempo de ensayo es muy prolongado para evaluar la reactividad de los agregados 6 a 12 meses.
- La primera y principal falencia que tiene este método es que la circulación de humedad dentro del recipiente de estacionamiento produce la lixiviación de los álcalis que están próximos a la superficie y la segunda es que falla el cierre hermético de los recipientes contenedores con una pérdida de humedad que produce una importante influencia sobre la medida de expansión.
- Las variantes introducidas en la norma en 1992 para las condiciones de estacionamiento como la modificación de los recipientes de almacenamiento

mejoraron las condiciones de ensayo para mantener la humedad relativa y de esta manera permite obtener resultados más certeros.

- A pesar de las deficiencias antes citadas, el método permite caracterizar adecuadamente a los agregados de reacción rápida o normal.
- Este método es apropiado para estudiar el efecto “pessimun” cuando es necesario hacer mezclas de agregados.
- A fines de la década de 1990, el ensayo perdió vigencia para caracterizar a los agregados, debido a los inconvenientes citados, y al empleo con mayor frecuencia el método acelerado de la barra de mortero.

- Método acelerado de la barra de mortero, IRAM 1674:

Este método de ensayo se utiliza para caracterizar a los agregados a partir de principios de la década de 1990, sus principales características son:

- Es un método con un corto plazo de estudio y es aplicable a todo tipo de agregados.
- La utilización sistemática permite adquirir confianza en sus resultados y reemplaza al método de la barra de mortero.
- La normalización en Argentina en 1997, cambio el diseño de la elaboración del mortero de fluidez constante a una razón a/c constante. De esta manera se utiliza la misma cantidad de agua y en consecuencia se elimina la influencia de la variación de la porosidad de la matriz.
- Este método no es apropiado para evaluar la efectividad de un cemento de bajo contenido de álcalis o el empleo de aditivos químicos como solución tecnológica frente a la RAS.
- El método es apropiado para evaluar el empleo de AMA como inhibición de la reacción deletérea.
- Los resultados obtenidos muestran que los agregados de origen granítico no producen efecto “pessimun” y que el filler calizo no es apto como inhibidor para atenuar la RAS.
- Es un método utilizado para probar el comportamiento frente a la RAS de mezclas de hormigón en obra. A partir del 2003, se realizan ensayos utilizando las proporciones de agregados de la dosificación de obra, requisito aceptado por el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2005).

- *Método del prisma de hormigón, IRAM 1700:*

El método del prisma de hormigón comienza a utilizarse en la década de 1980 siguiendo los lineamientos de la norma canadiense CSA A 23-2 -14A y luego se aprueba la norma IRAM en 1997. Los comentarios y recomendaciones sobre la aplicación de este método son:

- En principio, la norma CSA establece un contenido unitario de cemento de 310 kg/m³. Posteriormente, basados en resultados y experiencias de obras, se eleva el contenido de cemento a 420 kg/m³, siendo congruente que el aumento de la temperatura a 38 °C acelera las reacciones químicas y en consecuencia el desarrollo de la expansión para detectar la reactividad de los agregados.
- La norma IRAM indica un acondicionamiento de las probetas distinto a la norma ASTM y CSA, pues se deben envolver con tela y polietileno y luego se colocan dentro de una bolsa de plástico para evitar el lavado de los álcalis y mantener la humedad en la superficie de las probetas. El desarrollo de la expansión se ve afectado por el proceso de almacenamiento.
- Los resultados de este ensayo son determinantes frente a los otros métodos,
- El método tiene buena reproducibilidad y sus resultados son confiables,
- El ensayo tiene una duración de un año, por lo tanto es necesario preveer el inicio de los ensayos con anticipación al inicio de la obra.
- El ensayo es muy versátil para estudiar soluciones tecnológicas, como el tipo y proporción de AMA, los cementos de bajo álcalis o incorporación de sales de litio. Para estas soluciones tecnológicas se aconseja prolongar el tiempo de ensayo hasta 2 años, pues las reacciones son más lentas y pueden constituir soluciones parciales.

5.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Stanton, T. E. "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate". Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 107, p 54, 1942.
- 2.- Fava, A. S. C., Manuele, R. J., Colina, J. F. y Cortelezzi, C. R. "Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento pórtland". Revista Técnica LEMIT Serie II N° 85, 1961.
- 3.- "Durabilidad del Hormigón Estructural". Editado por Irassar Edgardo, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, p 157, 2001.
- 4.- Fava, A. S. C. "El hormigón del túnel subfluvial Paraná- Santa Fe". LEMIT, Serie II, N° 152, La Plata, 1970.
- 5.- Comisión de estudio de la reacción álcali-sílice. "Investigación de la reactividad potencial con los álcalis de los cementos de los áridos utilizados normalmente en las obras del gran Buenos Aires y en una parte del litoral norte Argentino". VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Memoria. IV. Doc. 58. 273-280, 1968.
- 6.- Cortelezzi, C. R., Iñiguez Rodríguez, A. M. y Giai, S. B. "Estudio mineralógico de algunas calcedonias argentinas". LEMIT, Serie II, N° 173, La Plata, 1971.
- 7.- Batic, O., Wainsztein, M. y Iñiguez, A. "Estudio y experiencia sobre los agregados para hormigones empleados en la zona de Bahía Blanca en relación a la reactividad alcalina potencial". Publicado en Anales LEMIT 1-1974 pág. 225-245. Ídem Revista Técnica del LEMIT, Serie II, N°257, 1974.
- 8.- Grattan-Bellew, P. E., "Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japón, p 279, 1989.

9.- Scott, J. F. and Duggan, C. R., "Potential new test for alkali-aggregate reactivity.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 319, 1986.

10.- Hudec, P. P. and Larbi J. A., "Rapid methods of predicting alkali reactivity.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japon, p 313, 1989.

11.- Schmitt, J. W. and Stark, D. C., "Recent progress in development of the osmotic cell to determine potential for Alkali-Silica Reactivity of aggregates.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japon, p 423, 1989.

CAPITULO 4

EXPERIENCIAS REALIZADAS CON AGREGADOS DE DIFERENTES PROCEDENCIAS

1.- INTRODUCCION

En los primeros capítulos se describieron los métodos de ensayo para evaluar la reactividad alcalina potencial de los agregados frente a los álcalis, contenidos en la solución de poros del hormigón, aportados principalmente por el cemento portland. Cada método tiene ventajas y desventajas entre ellas: el tiempo de ensayo, las condiciones de ataque cuando se lo compara con el medio real en el cual estará la estructura, la reproducibilidad y la repetitividad [1]. Por otro lado, para seleccionar el método de ensayo para evaluar la reactividad potencial de los agregados es conveniente tener en cuenta su composición mineralógica determinada previamente con el estudio petrográfico [2]. En ciertos agregados de reacción lenta, su clasificación como reactivos o no depende del método de ensayo adoptado [3]. Los tres métodos de ensayo más usados en Argentina son: el estudio petrográfico IRAM 1649 [2], el método acelerado de la barra de mortero según IRAM 1674 [4] y el método del prisma de hormigón según IRAM 1700 [5].

En este capítulo se presentan los resultados de clasificación de distintos tipos de agregados de la República Argentina obtenidos con tres métodos de ensayo y se realiza un análisis comparativo de los mismos. Para ello se evaluaron agregados finos y gruesos de distinto origen, tales como basalto, canto rodado, riolita, metacuarcita, arenas, sílicea y cuarzo lítica y granitos, los cuales fueron caracterizados mineralógicamente. Para cada agregado se obtuvieron los resultados de expansión por IRAM 1674 e IRAM 1700 y se evaluó su reactividad potencial de acuerdo a los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201 - 2005. En función de la mineralogía se estudian algunas modificaciones, como por ejemplo los límites de expansión y/o la edad de evaluación, ya sea prolongando

los estudios o disminuyendo los valores máximos de expansión, principalmente en el caso de agregados de reacción lenta, a fin de asegurar su reactividad.

2.- AGREGADOS UTILIZADOS: Clasificación Petrográfica

El estudio comprendió el análisis de 16 muestras de agregados finos y gruesos de una variada mineralogía procedente de distintas canteras en explotación de diversos lugares de la Argentina. El conjunto de agregados en estudio está focalizado en los agregados graníticos del sistema de sierras de Tandilia en la provincia de Buenos Aires, provenientes de Olavarría, Tandil, Azul. También se analizaron: una metacuarcita de Pigüé, agregados patagónicos, un basalto de Córdoba y una arena cuarzo-feldespática procedente del Río Uruguay. En la tabla 1 se identifican las muestras y se realiza una breve descripción petrográfica - mineralógica de las mismas [6-8].

Tabla 1: Identificación y clasificación petrográfica de los agregados.

Tipo de agregado	Origen	Desig.	Estructuras/texturas	Composición mineralógica	Clasificación petrográfica
Granítico	Pcia de Bs.As.	GA1	Tamaño de grano mediano a grueso, estructura compacta y fresca	Cuarzo (AEO = 12,3°), feldespato potásico, plagioclasa, micas, anfíboles	Migmatita granítica (62,1 %)
			Tamaños de grano fino a mediano, estructura compacta y fresca	Cuarzo ((AEO = 11,4°) levemente recristalizado), plagioclasa, feldespato potásico, micas	Migmatita granodiorítica (37,9 %)
Granítico		GA2	Tamaño de grano en general fino, estructura maciza	Porfiroclastos (15%) (cuarzo (AEO = 17,6°), feldespato potásico, plagioclasa y anfíboles) y la matriz (85%)(cuarzo (AEO = 18,4°), y menor proporción de otros minerales.	Milonita granítica (100%)

Continuación tabla 1: Identificación y clasificación petrográfica de los agregados.

Tipo de agregado	Origen	Desig.	Estructuras/texturas	Composición mineralógica	Clasificación petrográfica
Granítico	Pcia de Bs.As.	GA3	Tamaño fino a muy fino, estructura planar	Porfiroclastos (feldespatos) y matriz (cuarzo recristalizado)	Milonita granítica
Granítico		GA4	Tamaño de grano medio, estructura maciza algunas cataclástica	Cuarzo ((AEO = 11,3°) Algunos sectores de recristalización), feldespatos potásicos, plagioclasas, mica y minerales accesorios.	Migmatita granítica (84,8%)
			Tamaño de grano medio, estructura esquitosa	Anfíboles, plagioclasas, micas y minerales accesorios	Anfibolita (15,2%)
Granítico		GO1	Tamaño de grano fino a muy fino	Porfiroclastos (plagioclasa y feldespatos) y matriz (cuarzo recristalizado)	Protomilonita
Granítico		GO2	Tamaño de grano mediano, estructura compacta y fresca	Cuarzo (AEO = 11,6°), feldespato potásico, plagioclasa, anfíboles	Migmatita granítica (98,5%)
			Tamaño de grano mediano, estructura compacta y fresca con textura granoblástica	Anfíboles, plagioclasas, epidoto. ftanita	Anfibolitas (1,5%)

Continuación tabla 1: Identificación y clasificación petrográfica de los agregados.

Tipo de agregado	Origen	Desig.	Estructuras/texturas	Composición mineralógica	Clasificación petrográfica	
Granítico	Pcia de Bs.As.	GO3	Tamaño de grano mediano a grueso, estructura maciza	Cuarzo ((AEO = 12,5°) mosaicos de recristalización), plagioclasa, feldespato potásico, micas, anfíboles	Migmatita granodiorítica (100%)	
Granítico		GO4	Tamaño de grano mediano, estructura compacta y fresca	Cuarzo (AEO = 13,1°), plagioclasa, feldespato potásico, micas y anfíbol muy escaso	Migmatita granodiorítica (86%)	
				Idem anterior, diferencia radica en que abunda feldespato sobre la plagioclasa	Migmatita granítica (14%)	
Granítico		GT1	Tamaño de grano entre 0,5 a 0,7 mm, Estructura isótropa y equigranular	Cuarzo (AEO = 11,6°), con bordes parcialmente recristalizado), plagioclasa, feldespato potásico, mica y minerales accesorios	Granito protomilonitizado (100%)	
Granítico		GT2	Tamaño de grano mediano, con estructura maciza	Cuarzo ((AEO = 11,8°), forman mosaicos recristalizado), feldespatos potásico, plagioclasa piroxenos, mica)	Migmatita granodiorítica (99%)	
				Tamaño de grano mediano, estructura compacta y fresca	Anfíbol (predominante), plagioclasas, epidoto	Anfibolita (0,8%)
				Tamaño de grano fino a mediano	Cuarzo (AEO = 22,3°), micas y minerales opacos	Protomilonita cuarzosa (0,2%)

Continuación tabla 1: Identificación y clasificación petrográfica de los agregados.

Tipo de agregado	Origen	Desig.	Estructuras/ texturas	Composición mineralógica	Clasificación petrográfica
Metacuarcita	Pcia de Bs.As.	OP	Tamaño de grano 0,2 a 0,6 mm	Cuarzo ((99%) monocristalino, moderadamente deformado, bordes recristalizados (cuarzo microcristalino < 0,05 mm)	Metacuarcita
Basáltico	Pcia. de Córdoba	BC	Tamaño de grano fino, textura porfírica / intersertal	Fenocristales: olivina y microcristales de olivina y piroxeno, escaso vidrio volcánico	Basalto olivínico
Arena silícea	Río Uruguay	AO		Cuarzo (58%), Feldespatos potásicos (28%) Calcedonia (0.5%) Plagioclasa, piroxenos, mica minerales opacos	Cuarzo -feldespática
Riolita	Patagonia	R	Textura de la pasta intersertal	Pasta parcialmente recristalizada, fenocristales (calcita – sílice) parcialmente alterados (argilizados), 45 % de pasta, escaso vidrio volcánico relíctico	Riolita
Arena cuarzo lítica		ACL	--	Cuarzo (43%), líticos (41%) vidrio volcánico en pasta de riolitas y andesitas. Calcedonia (1%)	Cuarzo lítica
Canto rodado		CRV	--	Vulcanitas (70%) acidas (riolitas) y basicas (andesitas mas basalto), tobas líticas (20%) y 10% restante areniscas cuarzosa, cuarzo y rocas graníticas	Lítico

3.- EVALUACION DE LOS AGREGADOS CON DISTINTOS METODOS DE ENSAYO

3.1.- Método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 (ASTM C1260)

3.1.1.- Materiales

Para estas experiencias se utilizó un cemento portland normal (CPN 40) de alto contenido de álcalis equivalente comprendido entre $0,90 \pm 0,1$ %. Dicha variación se debe a las distintas partidas de cemento utilizado. El agua de mezclado es desmineralizada y los agregados utilizados son los indicados en la Tabla 1. Para elaborar la solución alcalina 1N se utilizó NaOH en perlas de la calidad proanálisis [4, 9]

3.1.2.- Resultados

Los resultados de expansión fueron ordenados de acuerdo a la mineralogía y al origen de los agregados con el fin de obtener una mayor claridad. En la figura 1 se informan los agregados graníticos procedentes de la Provincia de Buenos Aires.

Al analizar los resultados de los agregados graníticos, se puede observar un comportamiento diferenciado en los valores de expansión obtenidos entre las distintas muestras estudiadas, algunos no superan el límite de 0,100 % y otros los duplican. Cuatro agregados graníticos superan el límite (0,10 %) a los 16 días establecido por el Reglamento CIRSOC 201 (2005) [6], los mismos fueron identificados como GA2 y GA3, alcanzando una expansión mayor a 0,150 %; el GT2 con un valor de 0,120% y GO3 un valor de 0.104% que supera ligeramente el límite. Asociando los resultados de expansión con el estudio petrográfico (Tabla 1), se puede observar que las mayores expansiones obtenidas con el método acelerado de la barra de mortero se hallan vinculadas con el grado de recristalización de los granos de cuarzo, la deformación y/o tensión de los granos de sílice cristalina ($AEO \approx 18^\circ$) y al tamaño de grano fino a muy fino.

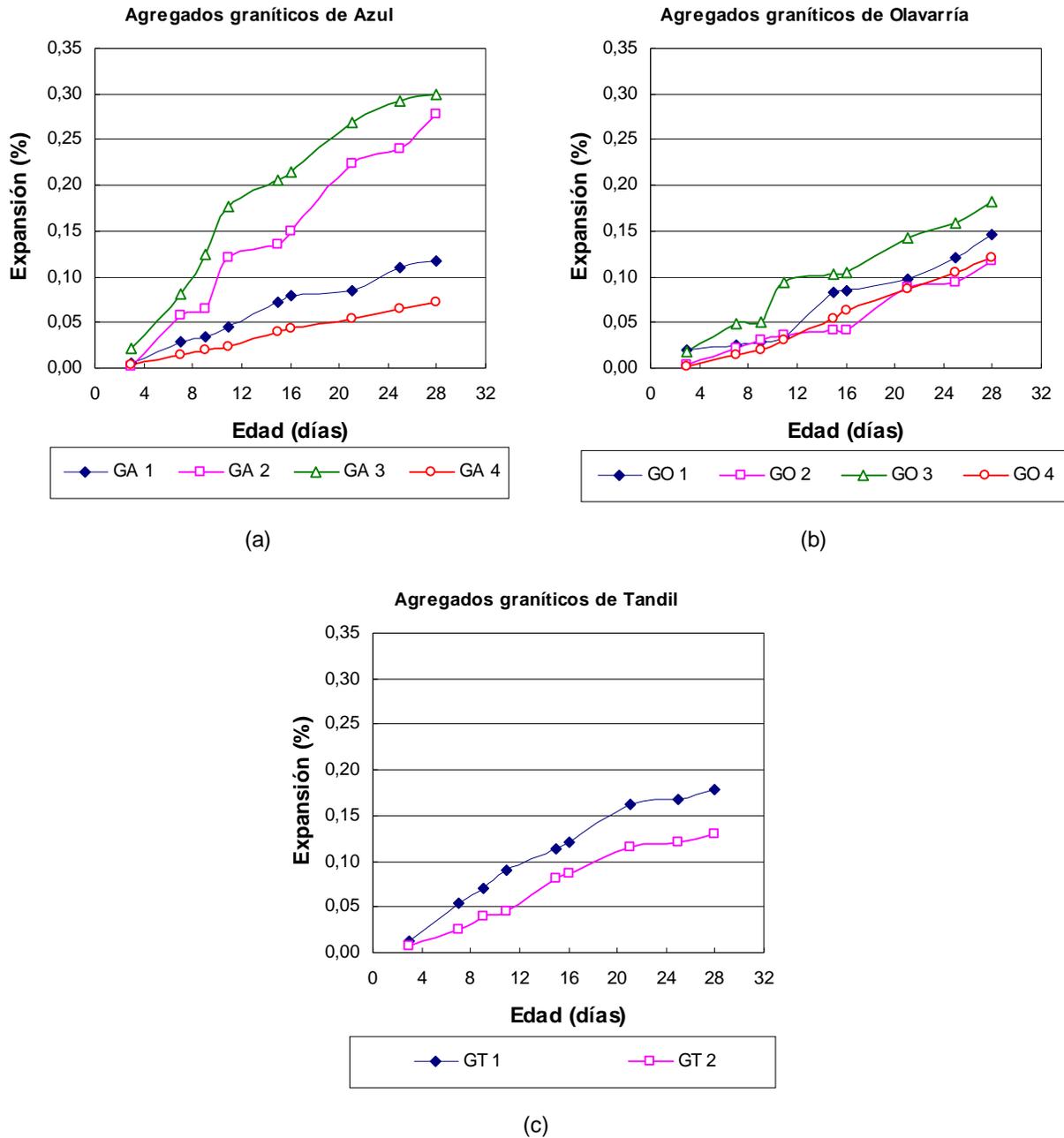


Figura 1. Expansión de agregados de distinta reactividad obtenidos con el método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674: (a) procedente de Azul; (b) procedente de Olavarría y (c) procedente de Tandil

El comportamiento de los agregados graníticos es muy difícil de cuantificar con un sólo método de ensayo, por lo tanto es conveniente complementar los estudios con el método del prisma de hormigón y estudios petrográficos. Esta consideración tiene en cuenta que algunos agregados superan el límite después de los 16 días de ensayos, ello

ocurre con agregados caracterizados como reactivos lentos, que son los que producen deterioros entre los 10 y 15 años luego de construida la obra.

En la figura 2 se muestran los resultados de los agregados caracterizados como potencialmente reactivos (líticos patagónicos y metacuarcita) por presencia de sílice reactiva (Figura 2a) y como no reactivos (riolita, basalto olivínico y arena cuarzo-feldespática) (Figura 2b) identificados en la tabla 1.

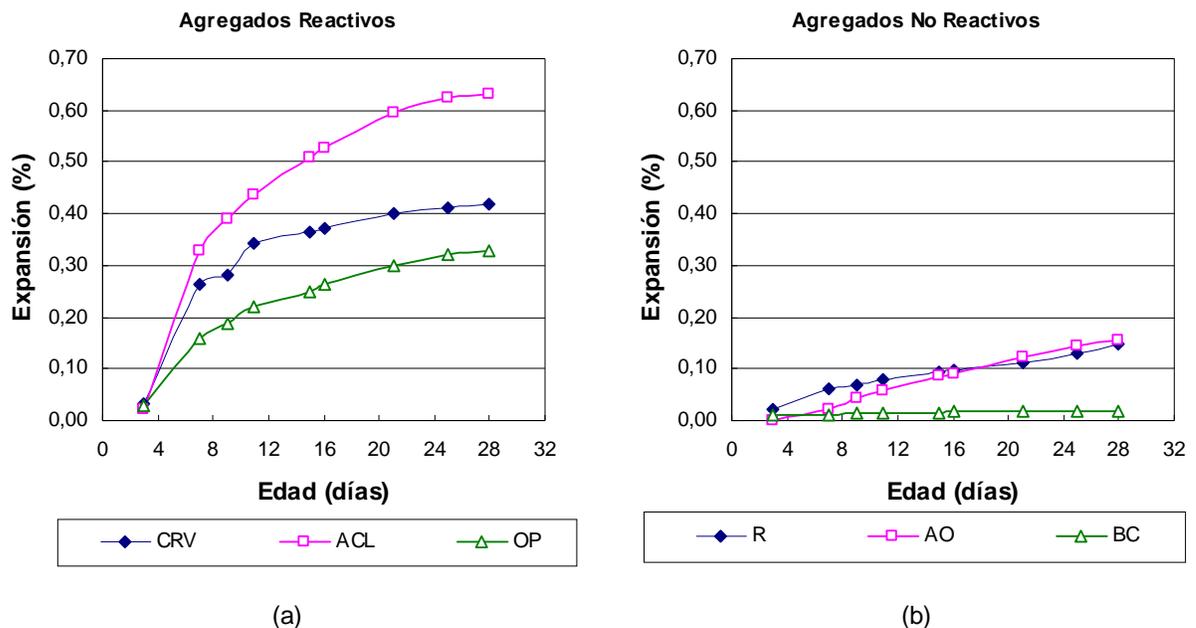


Figura 2. Expansión medida con el método acelerado de la barra de mortero para: (a) agregados reactivos por ópalo, calcedonia o vidrio volcánico y (b) agregados no reactivos

Cuando se estudian agregados que contienen sílice amorfa o criptocristalina, cuarzo tensionado y/o recristalizado, la expansión crece rápidamente como se muestra en la figura 2a y excede varias veces el límite impuesto por el Reglamento. El método de ensayo es confiable y caracteriza a los agregados de manera adecuada. Para los agregados no reactivos, la expansión no supera el valor de 0,100 % a 16 días, como se muestra en la figura 2b. Pero debe considerarse que si luego de los 16 días, la expansión supera el límite establecido es conveniente complementar los resultados con estudios de larga duración.

3.2.- Método del prisma de hormigón IRAM 1700 (ASTM C1293)

3.2.1.- Materiales

Para este ensayo se utilizó un cemento portland normal (CPN 40) de alto contenido de álcalis equivalente, variable entre $0,90 \pm 0,1$ % y agua de mezclado desmineralizada. Los agregados utilizados son los indicados en la tabla 1; como referencia se tomó como agregado grueso no reactivo el basalto procedente de Córdoba cuando se requiere estudiar un agregado fino, y como agregado fino de referencia se tomó la arena cuarzo-feldespática cuando se estudian agregados gruesos. Para obtener un contenido de álcalis equivalente a $5,25 \text{ kg/m}^3$ en el hormigón como requiere el método [5-10] se utilizó NaOH en perlas de calidad proanálisis.

3.2.2.- Resultados

En la figura 3 se observan los resultados de la expansión de los agregados graníticos procedentes de la provincia de Buenos Aires. En la figura 4 se observan los resultados de la expansión de los agregados caracterizados como potencialmente reactivos y no reactivos. Para evaluar los resultados obtenidos en el estudio se toma el límite adoptado por el Reglamento CIRSOC 201 [11], aceptar como expansión máxima 0,04% a un año (52 semanas). Los resultados se agrupan en forma similar que con el método acelerado de la barra de mortero.

Del análisis de la expansión desarrollado al cabo de un año, para el conjunto de agregados graníticos se observa que sólo un agregado (GA2), supera el límite (0,040%) establecido por el Reglamento CIRSOC 201-2005 [10]. Otros dos agregados están muy próximos al límite son GA1 (0,039% - Figura 3a) y GO2 (0,038% - Figura 3b). Por tratarse de agregados constituidos por cuarzo recristalizado, deformado y/o tensionado y/o microcristalino se comportan con una reacción lenta, y en varios casos el límite (0,040%) fue superado después del año (GA1, GA3, GO1, GO2 y GT1).

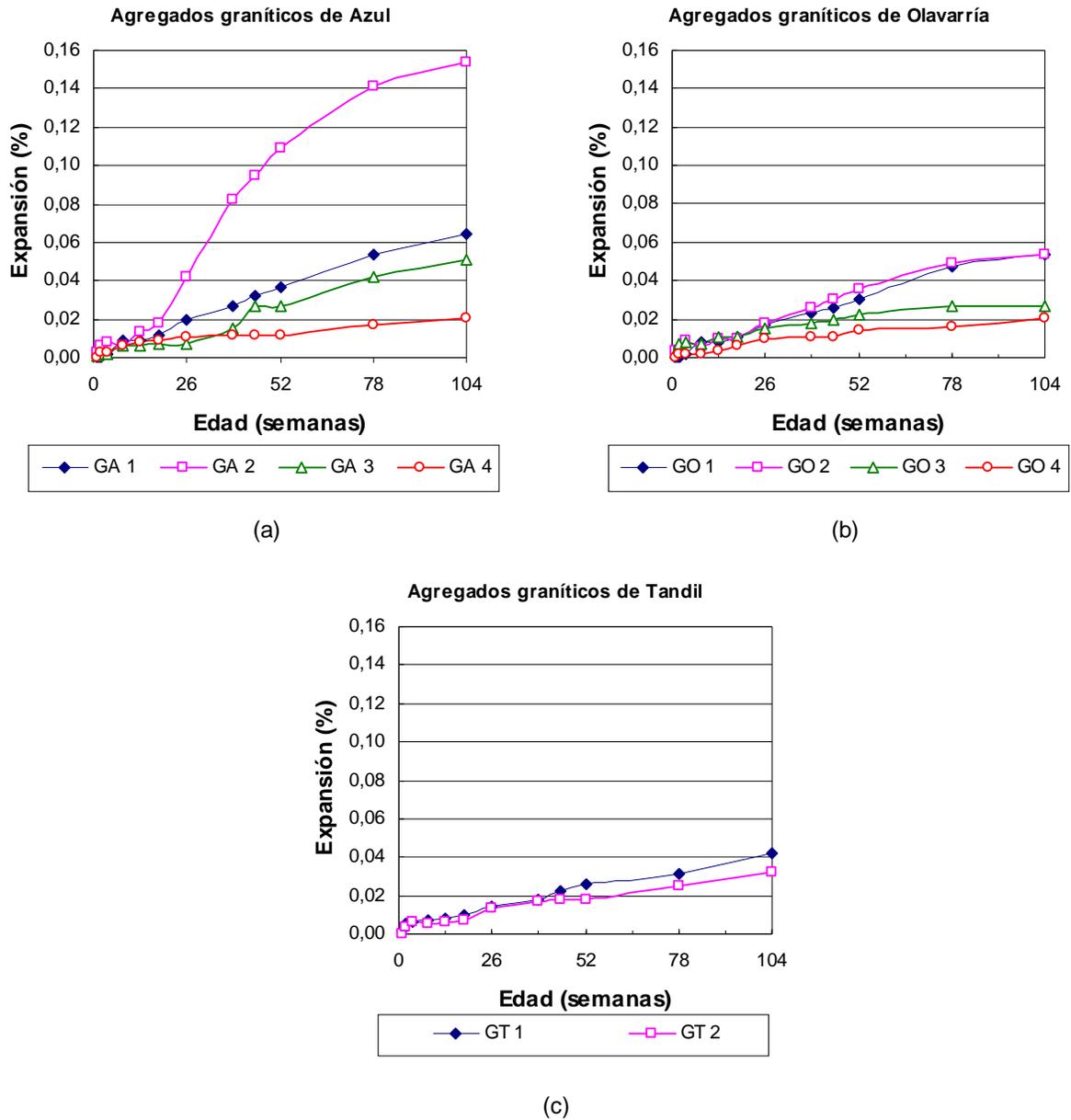


Figura 3. Expansión de agregados de distinta reactividad obtenidos con el método del prisma de hormigón IRAM 1700: (a) procedente de Azul; (b) procedente de Olavarría y (c) procedente de Tandil

Como en el caso del ensayo acelerado de la barra de mortero, para este tipo de agregado se aconseja prolongar la observación de la expansión. Los agregados que no superaron el límite de 0,040% al término de dos años son GA4, GO3, GO4 y GT2 y son considerados no reactivos. Comparando con el resto de los agregados tienen un tamaño de grano mediano, el AEO varía entre 11° y 13° (relativamente bajo con respecto a los 18° de la milonita), por lo general no tienen recristalización y el agregado está constituido por dos tipos de rocas, con lo cual bajaría el porcentaje de reactividad del conjunto de los

agregados. Los agregados que acusan expansiones superiores a 0,040% al término de dos años, son considerados de reacción lenta, los mismos tienen tamaño de grano fino a mediano, tienen bordes de recristalización y el AEO $\approx 12^\circ$

Cuando se estudian agregados que contienen sílice amorfa o cuarzo muy tensionado y/o recristalizado, como es el caso de los agregados cuyos resultados se muestran en la figura 4a, el método de ensayo es confiable y caracteriza a los agregados de manera adecuada al término de un año. Cuando los agregados no poseen minerales que reaccionen con los álcalis (Figura 4b), el método resulta muy confiable, pues las expansiones se mantienen bajas y uniformes en el tiempo con una pendiente nula.

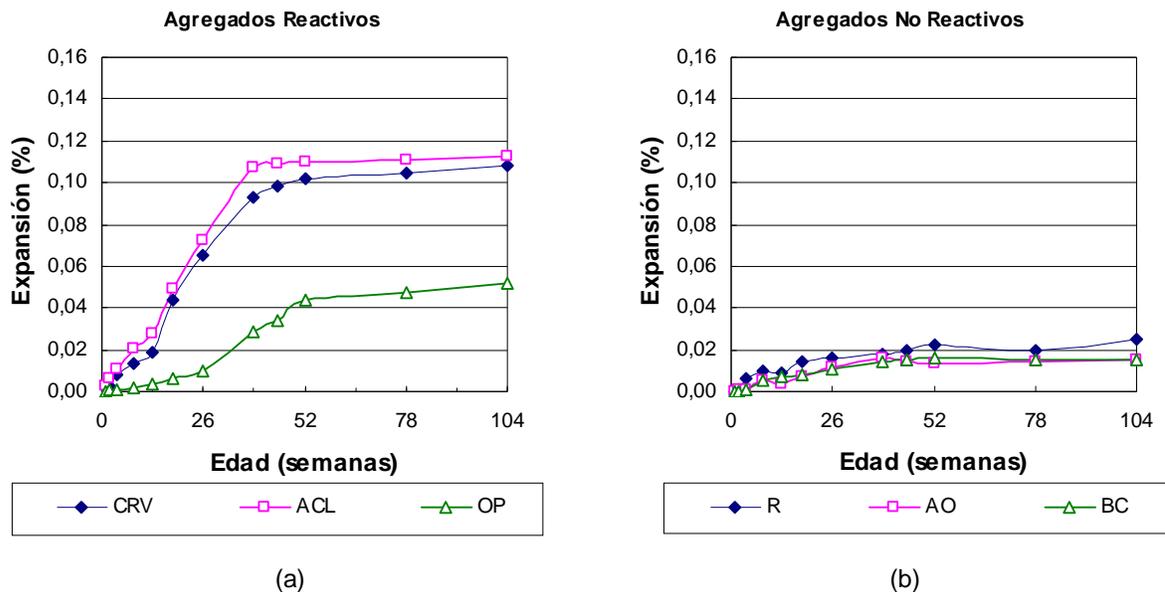


Figura 4. Expansión medida con el método del prisma de hormigón para: (a) agregados reactivos por ópalo, calcedonia o vidrio volcánico y (b) agregados no reactivos

4.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MÉTODOS DE ENSAYO

En la figura 5a se muestra los resultados de la expansión medida por el método acelerado de la barra de mortero a 16 días en relación con la expansión medida con el método del prisma de hormigón a 1 año. En dicha figura las dos líneas resaltadas representan los límites establecidos en el Reglamento CIRSOC 201 (2005) delimitando los cuadrantes de agregados reactivos y no reactivos. En ella los agregados fueron

agrupados en agregados graníticos y no graníticos. En la figura 5b se muestra la correlación lineal entre la expansión medida por ambos métodos de los agregados agrupados como graníticos y no graníticos.

Para el grupo de agregados no graníticos, como se mencionó anteriormente, se observa que existe coincidencia en la caracterización de los agregados como reactivos o no reactivos por ambos métodos. La expansión de los agregados se encuentra ubicada en el mismo cuadrante que determina los límites establecidos en el Reglamento CIRSOC 201 (2005) [11]. Para este tipo de agregados que contienen sílice amorfa o cuarzo muy tensionado y/o recristalizado, la figura 5b muestra que existe una muy buena correlación ($R^2 = 0,91$) entre la expansión medida por ambos métodos a la edad límite.

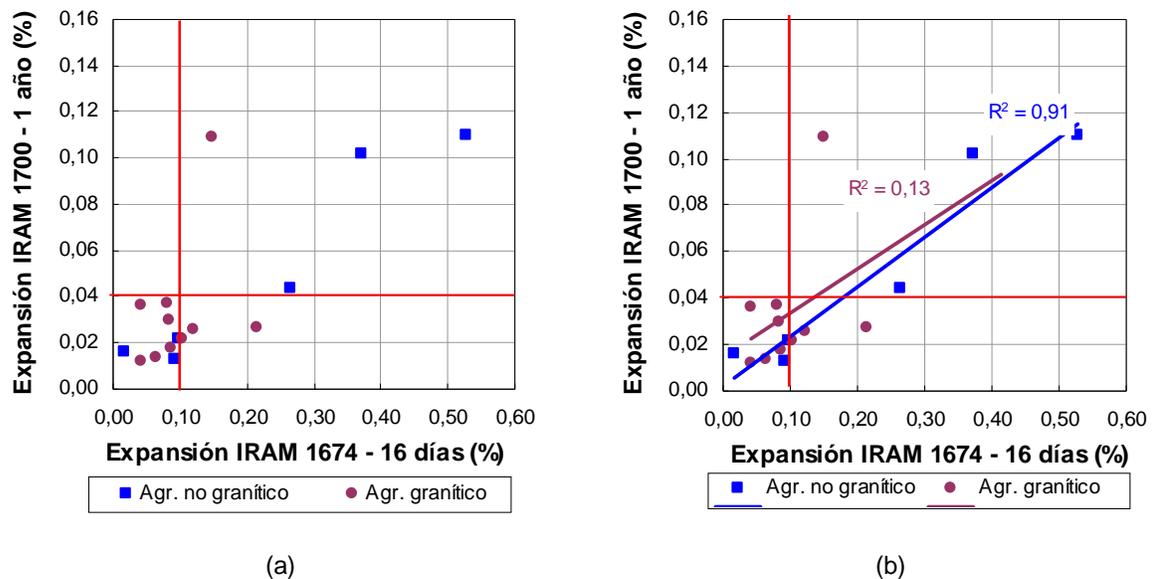


Figura 5. (a) Expansión medida en las barras de mortero a los 16 días y en los prismas de hormigón al año para los 16 agregados. (b) Correlación lineal entre los resultados de la expansión para los agregados graníticos y no graníticos

Para los agregados graníticos los resultados de la expansión son más dispersos. De las diez muestras analizadas, tres de ellas (GA3, GT1 y GO3) presentan una expansión que se localiza en el cuadrante reactivo para el ensayo IRAM 1674 mientras que para el ensayo IRAM 1700 se ubica en el cuadrante no reactivo. Para este grupo de agregados, no existe correlación ($R^2 = 0,13$) entre la expansión obtenida a la edad límite del Reglamento entre ambos métodos (Figura 5b).

Como los agregados graníticos tienen una reacción lenta a continuación se analizan distintas alternativas que puedan mejorar la calificación como reactivos o no para este tipo de agregados con los métodos de ensayos utilizados.

En primer lugar, se explora la prolongación de la edad a la cual medir la expansión en el ensayo acelerado de la barra de mortero a 21 y 28 días, y su correlación con la expansión de los prismas de hormigón a un año (Figura 6) manteniendo los límites reglamentarios actuales. Como segunda opción se analiza la modificación de la edad de medición para el ensayo IRAM 1674 y la prolongación del tiempo del ensayo IRAM 1700 a 2 años (Figura 7).

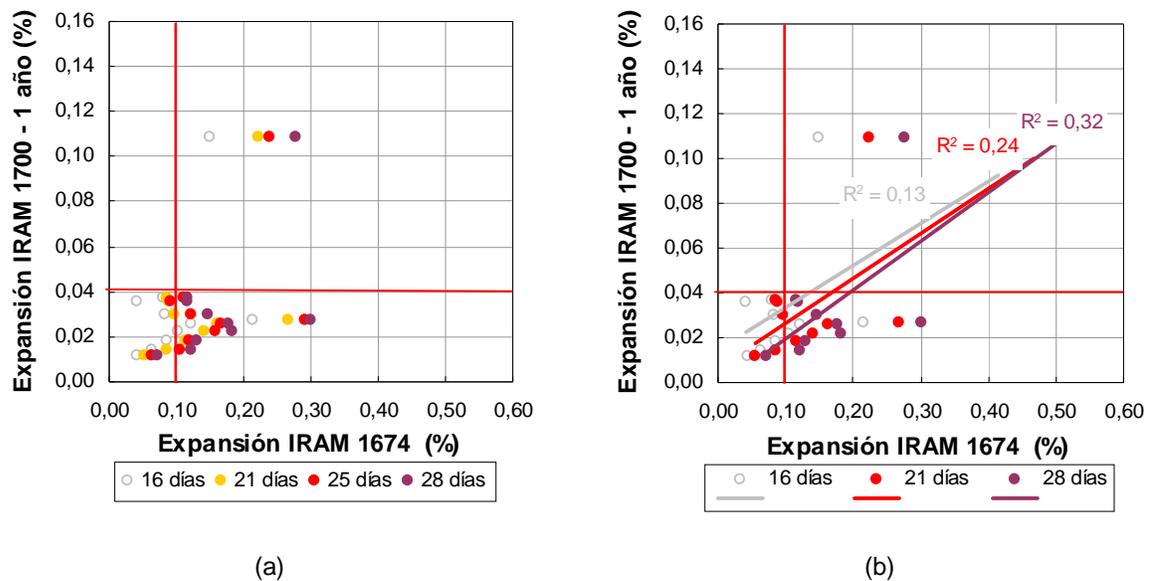


Figura 6. (a) Relación entre la expansión medida en las barras de mortero a los 16, 21, 25 y 28 días y en los prismas de hormigón al año para agregados graníticos. (b) Correlación entre los resultados a distintas edades

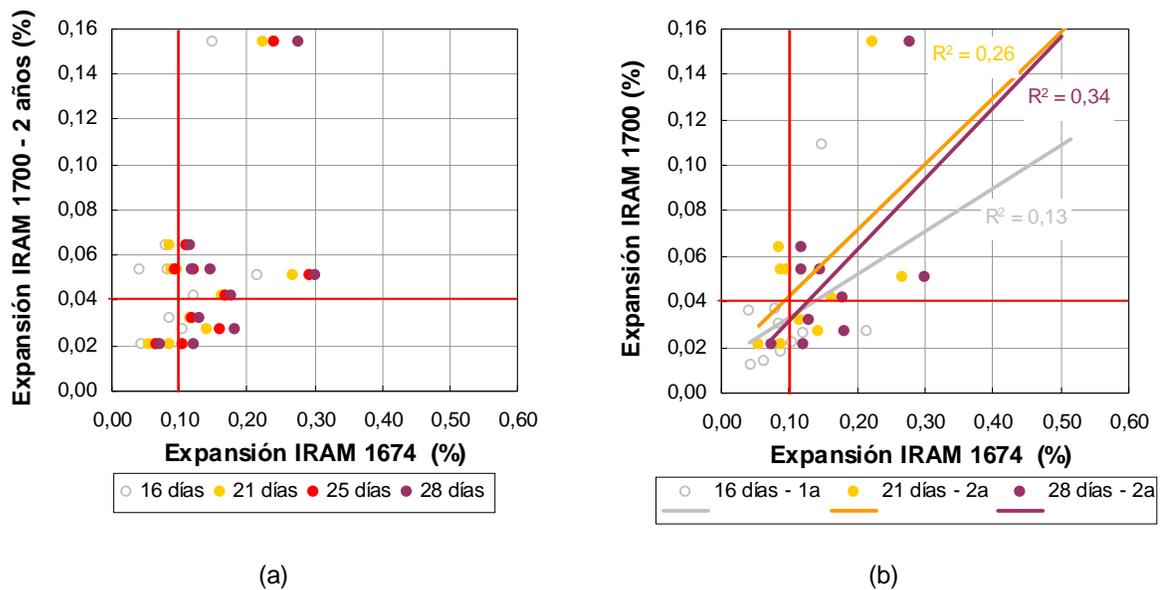


Figura 7. (a) Relación entre la expansión medida en las barras de mortero a los 16, 21, 25 y 28 días y en los prismas de hormigón a los dos para agregados graníticos. (b) Correlación entre los resultados a distintas edades

En la figura 6b se puede observar, que cuando se prolonga la edad de evaluación con el método acelerado de 16 días a 21 y 28 días, la correlación entre la expansión medida y la expansión del prisma de hormigón a 1 año mejora ($R^2 = 0,13, 0,24$ y $0,32$ a los 16, 21 y 28 días, respectivamente), pero igualmente sigue siendo muy baja. Resultados similares se observan en la Figura 7b cuando se compara la expansión del ensayo IRAM 1674 a distintas edades y la expansión del prisma de hormigón a 2 años. La mejor correlación se obtiene cuando evalúa la barra de mortero a 28 días y el prisma de hormigón 2 años ($R^2 = 0,34$). En todos los casos, hay que considerar que no existe correlación, pues el R^2 es muy cercano cero.

En la tabla 2 se realiza la síntesis de la calificación de los agregados estudiados en R o NR cuando se varía la edad de evaluación. Cuando se prolonga el tiempo para la evaluación de la expansión en la barra, un mayor número de agregados graníticos son considerados reactivos (de 4 a 8) en discrepancia con el prisma de hormigón. En cambio cuando se prolonga la evaluación con el prisma de hormigón la discrepancia en la calificación del agregado disminuye. Por otro lado cuando se evalúa con el prisma de hormigón a 2 años, se debe prolongar la edad de medición del prisma de hormigón para incrementar la coincidencia.

Tabla 2: Resultados en la variación de las edades propuestas para límites fijos

Edad (días)		Caracterización de los agregados					
		1674 = 1700		1674 ≠ 1700			
1674	1700			1674		1700	
		R	NR	R	NR	R	NR
21	365	1	5	4	-	-	4
25	365	1	2	7	-	-	7
28	365	1	1	8	-	-	8
21	730	3	2	2	3	3	2
25	730	5	1	3	1	1	3
28	730	6	1	3	-	-	3

Entre todas las alternativas analizadas, la mayor coincidencia en la calificación se logra cuando se evalúan los agregados a la edad de 28 días con el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674) y a la edad de 2 años con el método del prisma de hormigón (IRAM 1700). Del total de 10 agregados graníticos el 70% se caracteriza de igual manera con ambos métodos, de los cuales 6 son considerados reactivos y 1 no reactivo.

Otra posibilidad es variar los límites de expansión fijados y mantener la edad de evaluación establecida por el Reglamento CIRSOC 201 (2005). En la Figura 8 se muestra la calificación de los agregados graníticos estudiados cuando los límites propuestos son reducidos a 0,08 % para la barra de mortero y a 0,03% para el prisma de hormigón.

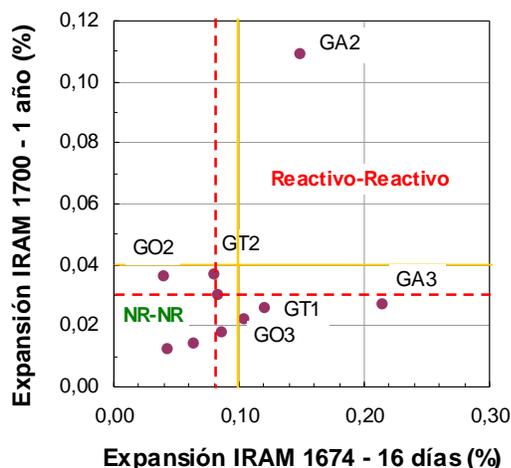


Figura 8. Relación de expansión de agregados graníticos fijando una expansión límite de 0,08% para IRAM 1674 y de 0,03% para IRAM 1700.

En la tabla 3 se resumen los resultados obtenidos por los dos métodos mencionados, cuando varían los límites y se mantienen las edades de ensayos establecidos para caracterizar la reactividad de los agregados: De los 10 agregados graníticos, la mayor coincidencia (70%) en la caracterización de los agregados como reactivos o no reactivos se obtiene con los límites vigentes; que indican 1 agregado reactivo (GA2) y 6 agregados no reactivos. Cuando se reducen los límites de expansión la discrepancia en la calificación aumenta por discrepancias debidas a los resultados de los dos ensayos.

Tabla 3: Resultados en la variación de los límites propuestos para edad fija.

Límites (%)		Caracterización de los agregados					
		IRAM 1674 = IRAM1700		IRAM 1674 ≠ IRAM 1700			
1674	1700	R	NR	1674		1700	
				R	NR	R	NR
0,100	0,040	1	6	3	-	-	3
0,080	0,030	3	2	4	1	1	4
0,100	0,030	1	3	3	3	3	3
0,080	0,040	1	3	6	-	-	6

Del análisis de las distintas variantes estudiadas para calificar a los agregados graníticos se encontraron dos relaciones edad de evaluación-límite de expansión que califican al 70% de los agregados de igual manera. Estas variantes son las actualmente vigentes en el Reglamento CIRSOC y por otro lado la prolongación de la evaluación a 28 días para la barra de mortero. Por esta razón se considera conveniente proponer una segunda edad de evaluación, para este tipo de agregados de reacción lenta especialmente con el objetivo de introducir una solución tecnológica que mitigue o inhiba el proceso expansivo de la RAS y permita prolongar la vida útil de la estructura.

5.- CONCLUSIONES

En este capítulo se estudiaron 16 agregados de distinto origen y mineralogía, los mismos fueron evaluados con los métodos más utilizados en Argentina: el análisis petrográfico IRAM 1649, el método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 y el método del prisma de hormigón IRAM 1700. Los resultados obtenidos permiten obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Para los agregados graníticos, el ensayo acelerado de la barra de mortero debe estar complementado con el estudio petrográfico para poder evaluar el grado de recristalización y/o deformación y/o tensión del cuarzo y de esta manera caracterizar adecuadamente al agregado.
- Para los agregados que contienen sílice amorfa o cuarzo muy tensionado o recristalizado, como puede ser el caso de la metacuarcita, el método acelerado de la barra de mortero es confiable para calificar los agregados como reactivos o no reactivos.
- Cuando se trata de agregados no-graníticos, los resultados del método acelerado de la barra de mortero y del prisma de hormigón presentan una correlación aceptable entre la expansión medida y una completa coincidencia en la calificación de los mismos como reactivos o no reactivos. En cambio, para los agregados graníticos la correlación de la expansión medida entre ambos métodos es muy pobre y sólo calificaron de igual manera (reactivos o no reactivos) al 70% de agregados estudiados.

- Para los agregados graníticos de reacción lenta, cuando se mantienen los límites de expansión indicados y se modifican las edades de evaluación a 28 días para el método acelerado de la barra de mortero y 2 años para el método del prisma de hormigón, la correlación entre la expansión mejora pero sigue siendo muy pobre y la calificación de los agregados se mantiene para el 70% de los casos estudiados.
- Para el estudio de los agregados frente a la RAS se recomienda, realizar el análisis petrográfico para caracterizar el tipo de agregado y la mineralogía que contienen, y con esta información proceder de la siguiente manera:
 - a) Si el agregado contiene sílice amorfa o cuarzo muy tensionado y/o recristalizado, se realiza la evaluación de acuerdo al Reglamento CIRSOC 201-2005: por el método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 evaluando a 16 días que no supere el límite de expansión de 0,100 % o si se aplica el método del prisma de hormigón IRAM 1700, que no supere a 1 año el límite de expansión de 0,040 %.
 - b) Si los agregados contienen cuarzo tensionado y/o deformado que pueden producir reacción lenta, se recomienda prolongar el ensayo de la barra de mortero hasta 28 días y el ensayo de los prismas de hormigón hasta los 2 años para interpretar los resultados.

En el caso a) si los agregados superan los límites indicados son caracterizados como reactivos y en el b) como reactivos lentos.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- 1.- "Durabilidad del Hormigón Estructural". Editado por Irassar Edgardo, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, p 157, 2001
- 2.- Norma IRAM 1649. "Examen petrográfico de agregados para hormigón". Argentina, 2008.
- 3.- Grattan-Bellew, P. E. "Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 279, 1989.

- 4.- Norma IRAM 1674. “Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero”. Argentina, 1997.
- 5.- Norma IRAM 1700. “Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcalis-agregado”. Argentina, 1997.
- 6.- Batic, O. R., Sota, J. D., Milanesi, C. A., Pavlicevic, R., Cortelezzi, C. R. “Estudio de rocas graníticas de la pcia. de Bs. As. desde el punto de vista de la reactividad con los álcalis del hormigón.”, Revista Hormigón N° 33, p 11, 1999.
- 7.- Batic, O. R., Sota, J. D. y Falcone, D. D. “RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta”, Revista ciencia y tecnología del hormigón, N° 12, p 13, 2005.
- 8.- Cortelezzi, C. R., Traversa, L. P. y Pavlicevic, R. E. “Aspectos geotécnicos de los principales agregados para hormigones empleados en la República Argentina”, Tercer Congreso Nacional de Geología Económica, Olavarría, tomo III, p B1, 1988.
- 9.- ASTM C 1260-01. “Standard test method for potential alkali reactivity of aggregate (mortar-bar method)”. Americana, Volume 04.02, Concrete and aggregates, p 677, 2008.
- 10.- ASTM C1293-01.”Standard tests method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction”. Americana, Volume 04.02, Concrete and aggregates, p 682, 2008.
- 11.- Reglamento CIRSOC 201-2005. Presidencia de la Nación. Secretaría de Obras Públicas. “Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón”, Capítulo 2, p 19, 2005

CAPITULO 5

CONSIDERACIONES FINALES

1.- CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta la información sobre los distintos métodos de ensayo para evaluar la reactividad potencial de los agregados frente a los álcalis (RAS) obtenida de la búsqueda bibliográfica, las normativas, los antecedentes del LEMIT desde 1965 y los resultados obtenidos de las experiencias realizadas con los agregados en estudio, se puede arribar a las siguientes conclusiones generales:

- Los métodos de ensayo para evaluar la reactividad de los agregados frente a los álcalis, proporcionan una herramienta fundamental para detectar la RAS y estudiar las soluciones tecnológicas que impidan de esta manera el deterioro de las estructuras de hormigón. El estudio se realiza principalmente sobre los agregados, ya sean gruesos o finos, que se utilizarán en la elaboración del hormigón.

- Los métodos de ensayo pretenden obtener resultados, en el mínimo tiempo de ejecución, que se correlacionen con el comportamiento futuro en la obra. Pero es sabido que los resultados son más precisos a medida que aumenta la duración y el estacionamiento se asemeje al que estará expuesta la estructura. La vinculación de los resultados de laboratorio con el comportamiento en obra comúnmente se desvirtúa en función del cambio en los mecanismos de la reacción debido al aumento del grado de agresividad comparado con la exposición de la estructura de hormigón. Las variables más usadas para acelerar los tiempos de ensayo son modificar la temperatura y/o el contenido de álcalis de las mezclas de mortero u hormigón. En este sentido se encuentran normalizados, el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, ASTM C1260, RILEM AAR-2, CSA A 23-2-25A) y el

método del prisma de hormigón (IRAM 1700, ASTM C1293, RILEM AAR-3, CSA A23-2-14A).

- En cuanto a los métodos de ensayo, su empleo tampoco se puede generalizar para cualquier tipo de mineralogía del agregado. Cuando el agregado está constituido por sílice inestable o sea que son caracterizados como de alta reactividad, la mayoría de los métodos de ensayo lo pondrá de manifiesto a corto plazo. El mayor inconveniente radica cuando se evalúan agregados de reacción lenta que contienen cuarzo tensionado y/o deformado y/o recristalizado en su constitución, para los cuales algunos métodos no permiten calificar a ciertos agregados como potencialmente reactivos debido a las condiciones establecidas en el ensayo o debido a la edad en que se evalúa la expansión. Esta incertidumbre genera la necesidad de continuar con el estudio y desarrollo de ensayos acelerados sobre agregados reactivos con diferente mineralogía.

- Las principales conclusiones con respecto a los métodos normalizados en Argentina son:
 - *Método de la barra de mortero, IRAM 1637:*
 - El tiempo de ensayo es muy prolongado (6 a 12 meses) para evaluar la reactividad de los agregados.
 - La circulación de humedad dentro del recipiente de estacionamiento produce la lixiviación de los álcalis que están próximos a la superficie que influye sobre la expansión.
 - El método permite caracterizar adecuadamente a los agregados de reacción rápida o normal, y es apropiado para estudiar el efecto “*pessimum*” para mezclas de agregados.

 - *Método acelerado de la barra de mortero, IRAM 1674:*
 - El tiempo de ensayo es corto (16 días) y aplicable a todo tipo de agregados.
 - Este método no es apropiado para evaluar la efectividad de un cemento de bajo contenido de álcalis o el empleo de aditivos químicos como solución tecnológica frente a la RAS.
 - El método es apropiado para evaluar el empleo de AMA como inhibición de la reacción.

 - *Método del prisma de hormigón, IRAM 1700:*

- El tiempo de ensayo es muy prolongado (un año), por lo tanto es necesario preveer los ensayos de agregados con anticipación a ser usados en obra.
 - Los resultados de este ensayo son confiables y determinantes frente a los otros métodos. Tiene buena reproducibilidad.
 - El ensayo es muy versátil para estudiar soluciones tecnológicas, como el tipo y proporción de AMA, los cementos de bajo álcalis o incorporación de sales de litio.
- El estudio comparativo de los ensayos para calificar a 16 agregados de distinto origen y mineralogía, evaluados por el análisis petrográfico IRAM 1649, el método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 y el método del prisma de hormigón IRAM 1700 permite concluir que:
- Para los agregados que contienen sílice amorfa o cuarzo muy tensionado o recristalizado, como puede ser el caso de la metacuarcita, el método acelerado de la barra de mortero es confiable para calificar los agregados como reactivos o no reactivos, ya que sus resultados coinciden con el estudio petrográfico y la expansión en los prismas de hormigón a un año.
 - Para los agregados graníticos, conteniendo cuarzo tensionado y/o deformado, la reacción es lenta y el ensayo acelerado de la barra de mortero calificó en el mismo sentido que el ensayo del prisma de hormigón al 70% de agregados estudiados. La expansión medida por ambos métodos a la edad establecida en el Reglamento CIRSOC presenta una pobre correlación. La prolongación de las edades de evaluación a 28 días para el método acelerado de la barra de mortero y 2 años para el método del prisma de hormigón, o cuando se mantienen los límites de expansión indicados, no mejoró la calificación de los agregados graníticos estudiados.
- Para el estudio de los agregados frente a la RAS se recomienda, realizar el análisis petrográfico para caracterizar el tipo de agregado y la mineralogía que contienen, y con esta información proceder de la siguiente manera:
- a) Si el agregado contiene sílice amorfa o cuarzo muy tensionado y/o recristalizado, se realiza la evaluación de acuerdo el Reglamento CIRSOC 201-2005: por el método acelerado de la barra de mortero IRAM 1674 evaluando a 16 días que no supere el límite de expansión de 0,100 % o si se aplica el

método del prisma de hormigón IRAM 1700, que no supere a 1 año el límite de expansión de 0,040 %.

- b) Si los agregados contienen cuarzo tensionado y/o deformado que pueden producir reacción lenta, se recomienda prolongar el ensayo de la barra de mortero hasta 28 días y el ensayo de los prismas de hormigón hasta los 2 años para interpretar los resultados.
- c) Para evaluar soluciones tecnológicas para inhibir la RAS, para los métodos de ensayos disponibles es conveniente utilizar los límites propuestos como si se tratase de un agregado de reacción lenta.

2.- ESTUDIOS FUTUROS

La presente tesis constituye un aporte al conocimiento de los distintos métodos de ensayo que existen para evaluar la reactividad frente a los álcalis de los agregados que se utilizaran para la elaboración del hormigón. También se presentan propuesta para mejorar la interpretación de los resultados de ensayos, modificando los límites en función de la petrografía de los agregados. Con estudios previos a la utilización del agregado en el hormigón, se puede prevenir la RAS, sin embargo, hay pocos antecedentes sobre metodología de reparación de estructuras ya afectadas que pueden ser consideradas en futuras investigaciones sobre la RAS. En tal sentido, se presentan algunas de ellas:

- Realizar prototipos con agregados reactivos, generar la RAS, para poder aplicar distintas soluciones que detengan la reacción.
- Correlacionar la propuesta en el prototipo con estructuras reales afectada, siempre y cuando haya sido positiva dicha solución en el prototipo.
- Reparar los daños ocasionados por la reacción y evaluar en el tiempo el nuevo comportamiento de la estructura.

CAPITULO 6

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASTM C227 – 03. Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar – bar method)., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 152, 2008.

ASTM C289 – 07. Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method)., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 179, 2008.

ASTM C295 – 03. Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete., Volume 04.02, Concrete and Aggregates, p 199, 2008.

ASTM C 1260-01. “Standard test method for potential alkali reactivity of aggregate (mortar-bar method)”. Americana, Volume 04.02, Concrete and aggregates, p 677, 2008.

ASTM C1293-01.”Standard tests method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction”. Americana, Volume 04.02, Concrete and aggregates, p 682, 2008.

Batic O., Falcone, D. y Sota, J. “Influencia del contenido de álcalis en hormigones con agregados graníticos y basálticos”. XVI Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Editado por Sota J., Mendoza, p 249, 2006.

Batic O., Sota, J. y Franks, L. “Experiencias realizadas para identificar agregados reactivos con el método de la celda osmótica”. VIII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Córdoba, p 11, 1987.

Batic, O. R., Sota, J. D. "Reacciones deletéreas internas". Durabilidad del Hormigón Estructural. Editado por Fabian Irassar, AATH, Capítulo 4, p 157, 2001.

Batic, O. R., Sota, J. D. y Falcone, D. D. "RAS: Contribución para identificar agregados reactivos, en particular los de reacción lenta." Revista Ciencia y Tecnología N° 12, p 13, 2005.

Batic, O. R., Sota, J. D. y Falcone, D. D. "Reacción álcali-sílice. Comparación de resultados en métodos acelerados para detectar agregados reactivos." 15^{ta} Reunión Técnica, AATH, Santa Fe. Soporte electrónico, 2003.

Batic, O. R., Sota, J. D., Milanesi, C. A., Pavlicevic, R, Cortelezzi, C. R. "Estudio de rocas graníticas de la pcia. de Bs. As. desde el punto de vista de la reactividad con los álcalis del hormigón.", Revista Hormigón N° 33, p 11, 1999.

Batic, O., Wainsztein, M. y Iñiguez, A. "Estudio y experiencia sobre los agregados para hormigones empleados en la zona de Bahía Blanca en relación a la reactividad alcalina potencial". Publicado en Anales LEMIT 1-1974 pág. 225-245. Ídem Revista Técnica del LEMIT, Serie II, N°257, 1974.

Bakker, R. F. M. "The influence of test specimen dimensions on the expansion of alkali reactive aggregate in concrete". Proceeding of the 6th International Conference on Alkalies in Concrete, Ed by Idorn, G. M. and Rostam, S., Copenhagen, p 369, 1983.

Bérubé M. A., Fournier, B., Dupont, N., Mongeau, P. and Frenette, J. "A simple autoclave mortar bar method for assessing potential alkali-aggregate reactivity in concrete.", Proceeding of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ed by The Concrete Society, London, p 81, 1992.

Blanks, R. F. and Meissner, H. S. "Deterioration of concrete dams due to alkali-aggregate reaction". Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 71, p 3, January 1945.

Bollotte B. "Development of an accelerated performance test on concrete for evaluating its resistance to AAR.", Proceeding of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ed by The Concrete Society, London, p 110, 1992.

Chatterji, S. "A simple chemical test method for the detection of alkali-silica reactivity of aggregates.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 295, 1989.

Chatterji, S. "An accelerated method for the detection of alkali-aggregate reactivities of aggregate". Cementt and Concrete Research, Vol 8, p 647, 1978.

Colina, F., Wainsztein, M. y Batic, O. "Durabilidad de hormigones de cemento portland.", Revista Ingeniería del Centro de Ingenieros de la Pcia. de Buenos Aires N° 57, p128, 1967.

Comisión de estudio de la reacción álcali-sílice. "Investigación de la reactividad potencial con los álcalis de los cementos de los áridos utilizados normalmente en las obras del gran Buenos Aires y en una parte del litoral norte Argentino". VI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Memoria. IV. Doc. 58. 273-280, 1968.

Cortelezzi, C. R., Iñiguez Rodríguez, A. M. y Giaí, S. B. "Estudio mineralógico de algunas calcedonias argentinas". LEMIT, Serie II, N° 173, La Plata, 1971.

Cortelezzi, C. R., Traversa, L. P. y Pavlicevic, R. E. "Aspectos geotécnicos de los principales agregados para hormigones empleados en la República Argentina", Tercer Congreso Nacional de Geología Económica, Olavarría, tomo III, p B1, 1988.

CSA-A23.2-14A. "Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms". Canadiense, p 207, 2000.

CSA-A23.2-25A. "Test method for detection of alkali-silica reactivity aggregate by accelerated expansion of mortar bars". Canadiense, p 240, 2000.

Davies, G. and Oberholster, R. E. "An interlaboratory test programme on the NBRI accelerated test to determine the alkali reactivity of aggregates". National Building Research Institute, Special Report CSIRO, Petroria, South Africa, p 16, 1987.

Diamond, S. and Thaulow, N. "A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate". Cement and Concrete Research, Vol 4, p 591, 1974.

Durabilidad del hormigón estructural. Editado por Irassar Edgardo, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, p 157, 2001.

Falcone D., Batic, O. y Sota, J. "La humedad es necesaria para la RAS". XVI Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Editado por Sota J., Mendoza, p 241, 2006.

Fava, A. S. C. "El hormigón del túnel subfluvial Paraná- Santa Fe". LEMIT, Serie II, N° 152, La Plata, 1970.

Fava, A. S. C., Manuele, R. J., Colina, J. F. y Cortelezzi, C. R. "Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento pórtland". Revista Técnica LEMIT Serie II N° 85, 1961.

Grattan-Bellew, P. E. "Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggegate.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 279, 1989.

Hobbs M. "Influence of mix proportions and cement alkali content upon expansion due to the alkali-silica reaction". Technical Report 534, Cement and Concrete Association , UK, p. 31, 1980.

Hoobs, D. W. and Gutteridge, W. A. "Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction". Magazine of Concrete Research, 31, p 235, 1979.

Hudec, P. P. and Larbi J. A. "Rapid methods of predicting alkali reactivity.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 313, 1989.

Kammer, H. A. and Carlson, R. W. "Investigation of causes of delayed expansion of concrete in buck hydroelectric plant". Journal of the American Concrete Institute, Vol 37, p 665, June 1941.

Kanazu, T., Ohnuma, H., Nakano, T. and Ishida, H. "Study on the rapid estimation method of alkali aggregate reaction using concrete specimens." Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 375, 1989.

Knudsen, T. "A continuous, quick chemical method for the characterization of the alkali-silica reactivity of aggregates.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 289, 1986.

Krell, J. "Influence of mix design on alkali-silica reaction in concrete". Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 441, 1986.

McConnell, D., Melenz, R., Holland, W. and Kenneth, T. "Cement-aggregate reaction in concrete". Journal of American Concrete Institute, Vol 19, p 93, 1947.

Meissner, H. S. "Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker dam". Journal of the American Concrete Institute, Vol 37, p 549, April 1941.

Nishibayashi, S., Yamura, K. and Matsushita, H. "A rapid method of determining the alkali-aggregate reaction in concrete by autoclave.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 299, 1986.

Norma IRAM 1649. "Examen petrográfico de agregados para hormigón". Argentina, 2008.

Norma IRAM 1674. "Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero". Argentina, 1997.

Norma IRAM 1700. "Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcalis-agregado". Argentina, 1997.

Norma IRAM 1874-2. Agregados para hormigones. Evaluación de estructuras en servicio. Reacción álcali-sílice, 2004.

Oberholster, R. E. "Results of an international inter-laboratory test program to determine the potential alkali reactivity of aggregates by the ASTM C227 mortar prism method.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 368, 1986.

Ponce M. y Batic O. "Mecanismo y evolución de la RAS en hormigones con agregados de reacción rápida y lenta". Revista Hormigón, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, N° 41, p 39, 2005.

Ponce M. and Batic O. "Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate". Cement Concrete Research, Vol 36, N° 6, p 1148, 2006.

Reglamento CIRSOC 201-2005. Presidencia de la Nación. Secretaría de Obras Públicas. "Reglamento argentino de estructuras de hormigón", 2005

RILEM AAR-2. "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates. The ultra-accelerated mortar-bar test". Europea, 2000.

RILEM AAR-3. "Detection of potential alkali-reactivity of aggregates. Method for aggregate combinations using concrete prisms". Europea, 2000.

Rogers, C. A. and Hooton, R. D. "Leaching of alkalis in alkali-aggregate reaction testing.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 327, 1989.

Schmitt, J. W. and Stark, D. C. "Recent progress in development of the osmotic cell to determine potential for alkali-silica reactivity of aggregates.", Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 423, 1989.

Scott, J. F. and Duggan, C. R. "Potential new test for alkali-aggregate reactivity.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 319, 1986.

Stanton, T. E. "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate". Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 107, p 54, 1942.

Stark, D. "Osmotic cell test to identify potential for alkali-aggregate reactivity". Proceeding of the 6th International Conference on Alkalis in Concrete, Ed by Idorn, G. M. and Rostam, S., Copenhagen, p 351, 1983.

Stephen Lane, D. "Long-term mortar-bar expansion tests for potential alkali-aggregate reactivity.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 336, 1986.

Tamura, H. "A test method on rapid identification of alkali reactivity aggregate (GBRC Rapid Method).", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 304, 1986.

Tang, M., Han, S. and Zhen, S. "A rapid method for identification of alkali reactivity of aggregate". Cement and Concrete Research, Vol 13, p 417, 1983.

Vivian, H. E. "Some effects of temperature on mortar expansion". Australian Journal of Applied Science, Vol 2, p 114, 1951.

Yoshioka, Y., Kasami, H., Ohno, S. and Shinozaki, Y. "Study on a rapid test method for evaluating the reactivity of aggregate.", Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 314, 1986.