

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.

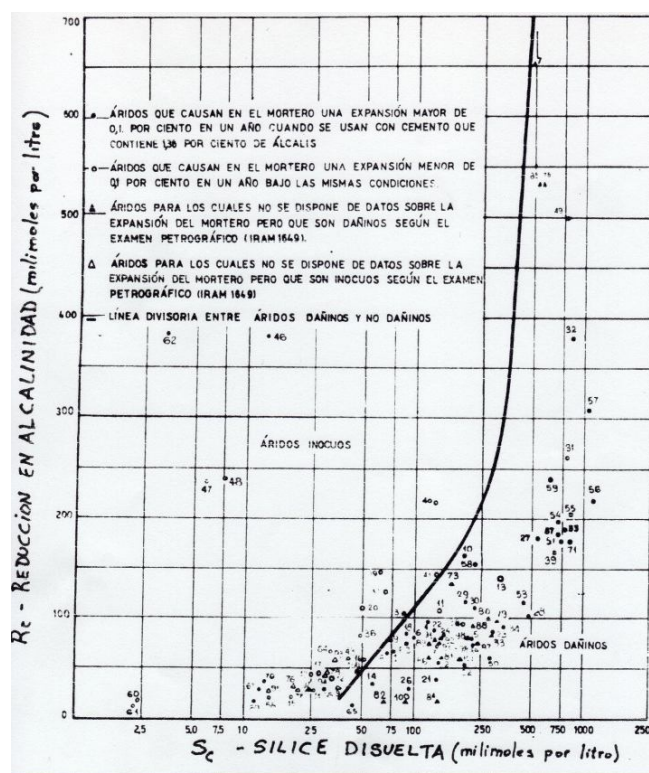


Figura 1. Gráfico adaptado de la norma IRAM 1650

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 $[\text{OH}^-]$ 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 silíceas 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.

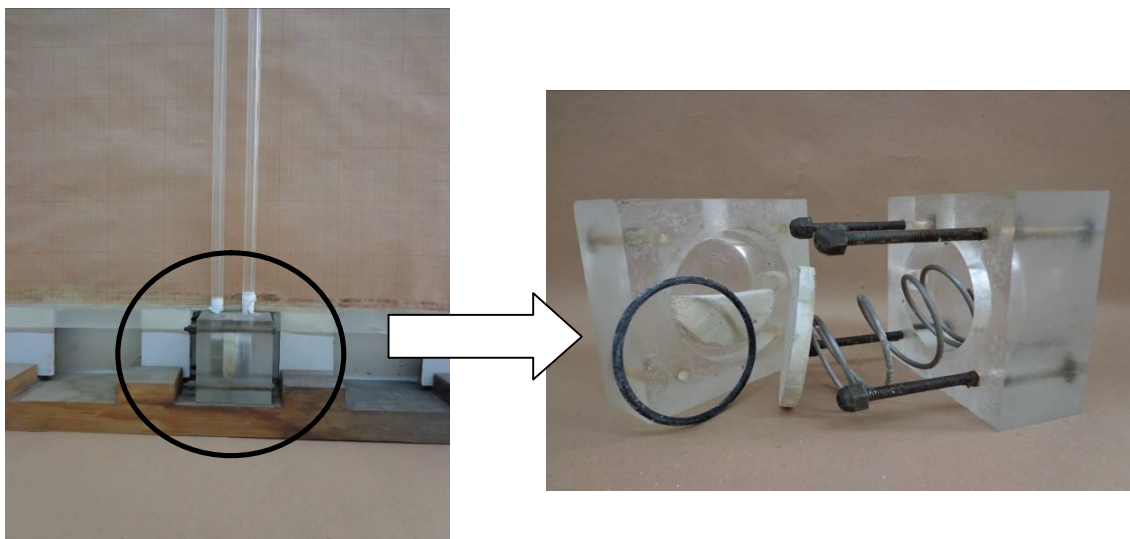


Figura 2. Equipo de la celda osmótica

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 $(\text{Na}_2\text{O})_{\text{eq}} = (0,658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$, 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 silíceas 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.
- Área 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

Fracciones (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

Fracciones (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

Bollotte [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". Cementt and Concrete Research, Vol 8, p 647, 1978.
- 19.- Schmitt, J. W. and Stark, D. C. "Recent progress in develoment 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.