

01146
4
2ej



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

**"ESTUDIO DE APLICACION DEL METODO DEL GEL
FLUORESCENTE PARA LA IDENTIFICACION DE LA REACCION
ALCALI-SILICE EN EL CONCRETO"**

HECTOR SALDIVAR MOGUEL

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

(CONSTRUCCION)

CIUDAD UNIVERSITARIA

AGOSTO, 1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**" entonces conocerán la verdad,
y la verdad los hará libres."
(Jn 8,32).**

" A mis padres y hermanos "

AGRADECIMIENTOS.

A mi director de tesis M. en I. Juan Luis Cottier Caviedes por sus importantes ideas y entusiasta apoyo en el desarrollo del trabajo.

Agradezco las sugerencias y comentarios del Ing. Jesús Mena Ferrer.

Al Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), mi gratitud por su cooperación al facilitarme sus instalaciones, material y equipo, para la realización de las pruebas y ensayos, parte fundamental de este trabajo.

Al Dr. Abraham Díaz Rodríguez por su apoyo en los trabajos de microscopía electrónica.

Expreso un reconocimiento sincero a todos los que tuvieron relación con este trabajo y contribuyeron a su culminación.

Y a todos aquellos, si bien no de una forma técnica pero si moral, me expresaron su apoyo y afecto, compañeros y amigos.

**"ESTUDIO DE APLICACION DEL METODO DEL GEL
FLUORESCENTE PARA LA IDENTIFICACION DE LA REACCION
ALCALI-SILICE EN EL CONCRETO"**

HECTOR SALDIVAR MOGUEL

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

Director de Tesis: M. en I. Juan Luis Cottier Caviedes.

CONTENIDO.

	<i>Página</i>
INTRODUCCION.	1
CAPITULO I. VISION GENERAL DE LA PROBLEMÁTICA ALCALI-SILICE.	4
1.1. Antecedentes.	4
1.2. Reacción Alcali-Agregado.	6
1.3. Reacción Alcali-Carbonato.	10
1.4. Reacción Alcali-Sílice.	11
1.4.1. Mecanismo de la Reacción.	12
1.4.2. Aspectos Relacionados con la Reacción Alcali-Sílice.	16
CAPITULO II. DIAGNOSTICO DE LA REACCION ALCALI-SILICE Y METODOS EXISTENTES PARA SU IDENTIFICACION.	24
2.1. Antecedentes.	24
2.2. Diagnóstico de la Reacción Alcali-Sílice en las Estructuras.	25
2.2.1. Inspección de la Estructura.	25
2.2.2. Muestreo.	32
2.2.3. Investigación de Laboratorio.	33
2.2.4. Análisis de los Resultados.	38
2.3. Evaluación de los Agregados Potencialmente Reactivos.	38
2.3.1. Introducción.	38
2.3.2. Métodos de Laboratorio para Evaluar la Reactividad Potencial de los Agregados.	38
2.3.3. Normatividad.	48
2.3.4. Procedimientos para Evitar o Disminuir el Riesgo de la Reacción Alcali-Sílice.	51

	<i>Página</i>
CAPITULO III. METODO DEL GEL FLUORESCENTE PARA LA IDENTIFICACION	55
IN SITU DE LA REACCION ALCALI-SILICE.	
3.1. Antecedentes.	55
3.2. Método del Gel Fluorescente.	56
3.2.1. Principio del Método.	56
3.2.2. Procedimiento y Materiales.	58
CAPITULO IV. ESTUDIO DE APLICACION DEL METODO DEL GEL	60
FLUORESCENTE.	
4.1. Introducción y Procedimiento General del Experimento.	60
4.2. Elaboración de las barras y Prueba de Expansión.	61
4.3. Análisis Químicos.	67
4.4. Estudios Petrográficos de las Barras.	68
4.5. Estudios de Microscopía Electrónica.	72
4.6. Aplicación del Método del Gel Fluorescente.	75
4.7. Discusión de los Resultados.	81
CONCLUSIONES.	83
BIBLIOGRAFIA.	87
AFENDICE.	93

INTRODUCCION.

El concreto es sin lugar a dudas el material de construcción más utilizado en todas las sociedades industrializadas de la actualidad, así la producción de concreto y la elaboración de sus constituyentes forman parte importante de la actividad económica y de generación de recursos de las sociedades modernas.

El concreto es un material que ofrece diversas aplicaciones, compuesto principalmente por un agregado, cemento Portland y agua, es un material durable y de buen comportamiento durante su vida útil. Sin embargo, puede en ciertas ocasiones presentar problemas que provoquen que la estructura no cumpla de forma adecuada la función para la cual fué concebida.

Son muchas las ventajas a favor del concreto que los problemas ocasionales que presenta son un precio mínimo que se paga por todos sus beneficios. Sin embargo, la mayoría de los problemas se pueden evitar si se conocen y comprenden mejor las causas que contribuyen a crearlos. De esta forma podemos desarrollar procesos que conjuguen calidad, eficiencia, seguridad, economía y lo que en la actualidad es fundamental, respeto al medio ambiente.

Este trabajo aborda uno de los fenómenos, la Reacción Alkali-Agregado (RAA), que se presenta en el concreto, y para la cual no existe actualmente una forma de eliminarla una vez presente, y cuyas consecuencias pueden ser severas en la estructura.

Es un problema conocido desde mediados de siglo, cuyo mecanismo no es claro aún, para ninguna de las formas de RAA como: Reacción Alkali-Sílice (RAS), Reacción Alkali Silicato y Reacción Alkali-Carbonato. De las anteriores la RAS es la más común y sobre la que se desarrolla el presente trabajo.

Varios aspectos influyen en la magnitud del deterioro por RAS, contenido de cemento, contenido de álcalis en el cemento, humedad, cambios cíclicos de humedad y sequía, tamaño de las partículas reactivas, etc. y puede darse el caso de existir la RAS pero no presentarse ningún daño.

El diagnóstico de estructuras que se sospeche presenten RAS es un proceso complicado. Se debe proceder de una forma sistemática y utilizar los ensayos y pruebas de laboratorio más adecuados para las condiciones de la estructura y tipo de agregado.

Existen ensayos de laboratorio que han probado ser muy sensibles para detectar concretos afectados por la RAS, pero requieren de más investigación.

A la fecha solo algunos métodos son considerados estadísticamente confiables para ser utilizados en la mayor parte de los materiales usados como agregados para el concreto. Por consiguiente, tener una metodología para realizar un juicio sobre el agregado es importante.

Existen varias propuestas de estos diagramas de decisión desarrollados en distintos países, pero que su aplicación o extrapolación a otros países o zonas en particular no es factible en algunos casos dado que están desarrollados para las condiciones específicas del lugar y de la experiencia sobre la RAS que se ha tenido localmente.

En México existe una propuesta de estos diagramas de decisión, en el Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NOM C111.

Se revisa la forma en que se desarrolló la RAS, los materiales que intervienen y sus características más relevantes. Se presentan los métodos más utilizados en el mundo para determinar la reactividad potencial de los agregados, así como la normatividad que existe en la materia a nivel mundial y en nuestro país.

Dos puntos de vista se ofrecen sobre el diagnóstico de la RAS, el primero que aborda el diagnóstico de la reacción en las estructuras, y del cual se presenta un diagrama de interacción para evaluar de una forma sistemática y completa a la estructura; y el segundo que trata de la evaluación de agregados potencialmente reactivos para su uso en el concreto de las estructuras.

Se reprodujo en laboratorio la RAS en barras para aplicar el Método del Gel Fluorescente (MGF) y además se aplicó a un concreto en campo, donde previamente se había diagnosticado la presencia de RAS. Se llevaron a cabo una serie de ensayos y pruebas de laboratorio y se correlacionaron con el MGF para determinar su efectividad.

Es mi deseo que este trabajo sea una contribución de utilidad para los Ingenieros que se desarrollan en la práctica del concreto y contribuya en la solución de problemas relacionados con lo que aquí se expone.

CAPITULO I.

VISION GENERAL DE LA PROBLEMÁTICA ALCALI-SILICE.

Sinopsis.

En el presente capítulo se expone el concepto de reacción álcali sílice, datos históricos del fenómeno, y el conocimiento actual que se tiene sobre el mecanismo de la reacción, así como otros factores que afectan el desarrollo de la misma, a saber, relación agua-cemento, temperatura, cambios cíclicos de humedad y sequía, y otros.

1.1. ANTECEDENTES.

El concreto es un material de construcción formado por un agregado, un cementante y el agua necesaria para que este cementante, tras una serie de reacciones químicas en el interior de la masa de esta mezcla, endurezca a medida que el tiempo transcurre. Una vez que ha fraguado el concreto, forma una roca artificial de características y comportamiento conocidos.

Una gran porción de las rocas naturales provienen de la sedimentación de elementos duros, producto de la desintegración parcial de rocas originales, en un medio acuoso con alto contenido de cal, mismo que a través de un largo proceso de solidificación da origen a un material resistente de sólidas cadenas cristalinas. El primer concreto elaborado por el hombre, procuró seguir para su constitución el proceso anterior. Los primeros rastros de su empleo se encuentran en Asia Menor unos 6000 años a.C., si bien en una forma primitiva. Una aplicación más próxima a la que hoy en día se le da, se tiene hace cuatro mil años antes de nuestra era en el antiguo Egipto, en donde se emplea en forma general para la unión de bloques de piedra tallada. Unos dos siglos antes de nuestra era, se aplicó en China un procedimiento a base de barro con un alto contenido de un sedimento eólico, para la construcción de la muralla China. Cien años a.C. los romanos iniciaron el empleo de cal apagada con tierra puzolánica en multitud de obras. En la región del Tajin,

correspondiente a la cultura Totonaca, existen edificaciones cuyos techos y entrepisos se encuentran hechos por una mezcla, apisonada en varios estratos, de cal y agregados inertes, contienen un "refuerzo" proporcionado en parte por fibras vegetales.

La época moderna del concreto nace cuando Smeaton, en 1756, utiliza la marga calcinada de cal, para la construcción del faro de Eddingstone, en Inglaterra. Unas cuatro décadas más tarde, Parker fabrica la cal hidráulica. En 1819, el alemán Jhon fundamenta el conocimiento científico del calcinado del cemento. El maestro albañil Aspdin obtiene el primer cemento Portland cinco años más tarde, mediante el calcinado de la piedra caliza y de su mezcla posterior con arcilla, con una calcinación final. El procedimiento fue perfeccionado paulatinamente hasta llegar a las primeras aplicaciones del concreto reforzado, debidas al jardinero francés Monier. La primera losa de concreto se cuela en 1867. La primera losa plana dos años más tarde, el primer puente de concreto reforzado en 1873 y la primera escalera en 1875.

Las bondades del concreto lo hacen ser utilizado en todas las obras de ingeniería. El primer cuerpo de especificaciones para el concreto nace el 1904. Este cuerpo, el código prusiano para la construcción, ha servido de base para los subsecuentes en todo el mundo. En México el concreto aparece en los primeros años del presente siglo. Las primeras clases sobre este tema, fueron impartidas en la Escuela Nacional de Ingenieros, antiguo Minería, en 1909, con el nombre de academias libres de concreto armado.

El cemento Portland actualmente consiste en una mezcla de clínquer Portland y yeso. El clínquer se compone fundamentalmente de materiales calcáreos (caliza) y arcillosos (arcilla y pizarra) u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de fierro, quemándolos a una temperatura de clínquerización (Aprox. 1450 °C). Se consideran cuatro compuestos principales producto de este proceso, el silicato tricálcico C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$), el silicato dicálcico C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$), Aluminato tricálcico C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$), y el Aluminoferrito tetracálcico C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$). Además de los componentes citados existen componentes menores como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O y Na_2O , que no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento. Dos de los componentes menores son muy importantes los óxidos de sodio y potasio, Na_2O y K_2O , que son los álcalis (aunque existen otros dentro del cemento), estos se encuentran en un rango de 0.2% a 1.3% en el cemento^{60,73}

Los edificios y estructuras más significativas de los últimos 60 años en el mundo están hechas de concreto o utilizan cemento en algunas etapas o elementos de la estructura. El desarrollo ha sido en diversos ámbitos: aplicaciones, proceso de producción, materiales constituyentes, conocimiento de su comportamiento, y fenomenologías.

Hasta hace unos 40 años el concreto se considera como un material inerte, actualmente se acepta de manera general el carácter activo del concreto, es decir, es un material que está sujeto a cambios químicos y físicos constantes motivados por agentes externos o por elementos o constituyentes internos de la masa.

La mayoría de los agregados utilizados en el concreto hidráulico son estables químicamente con el cemento, es decir, no entran en alguna interacción para provocar deterioro del concreto. Pero no siempre es el caso, existen agregados que reaccionan con los componentes del cemento, y afectan al concreto en su resistencia, durabilidad y comportamiento estructural. Uno de estos fenómenos es la Reactividad Alcali-Agregado.

1.2. REACCION ALCALI-AGREGADO.

La Reacción Alcali-Agregado (RAA), que a lo largo de su estudio ha merecido expresiones como el "cáncer del concreto", la reputación de "el monstruo del concreto"⁶⁹, o comparado con enfermedades virales¹⁷, es en su definición más simple, una reacción físico-química que se presenta en el concreto entre los álcalis del cemento y algunos componentes de ciertos agregados, reacción que a largo plazo y presentándose las cantidades apropiadas de los elementos de la reacción, en presencia de humedad, "condición pésima" -término que fue introducido por primera vez por Thomas Stanton en 1947-, puede llegar a deteriorar al concreto de manera severa y causar la pérdida de la estructura⁴⁰.

Desde 1940 se tienen reportes de expansiones perjudiciales en el concreto causadas por la reactividad alcali-agregado en todo el mundo. En los primeros años de la década de los 40's Stanton publicó trabajos que despertaron el interés de los investigadores. En ellos señalaba ciertos deterioros en construcciones de concreto, en el estado de California, E.U., en las que en 1930 Gibson había observado una fisuración de las denominadas "en mapa".^{61, 67}

Las fallas se presentaban en la región de Kansas-Nebraska en las que, por falta de agregados gruesos habían usado una mezcla más fina, que denominaron arena-grava. Las gravas constituían del 5 al 15 % del peso del agregado y eran predominantemente graníticas. En las arenas predominaban el cuarzo y el feldespato de potasio (ortoclasa). Los granos eran duros, densos y muy pulidos. Además, en menor cantidad, pero en porcentaje muy significativo, se observaron materiales opalinos y vidrios volcánicos, calizas con impurezas de ópalo, pizarras opalinas y pedernal.

En sus estudios Stanton y sus colaboradores comprobaron que, en presencia de humedad permanente, se originaba una reacción entre los álcalis del cemento y alguno de los agregados, a consecuencia de la cual se producían aumentos de volumen que fisuraban al concreto. La reacción se detectaba como originada entre los álcalis del cemento liberados por la hidrólisis y la sílice hidratada, en presencia de agua. Por esta razón la llamaron reacción álcali-agregado.

Las investigaciones de las décadas de los 40's y 50's tuvieron como resultado el establecimiento -como medida preventiva de la reactividad álcali-agregado- el uso de cementos bajos en álcalis, es decir, cementos con un contenido no mayor a 0.6% de óxido de sodio equivalente

TABLA 1. Clasificación del Daño en el Concreto.

1. Congelamiento y Deshielo.
2. Exposición a Agentes Químicos Agresivos.
3. Desgaste y Erosión.
4. Corrosión del Acero de Refuerzo y Otros Materiales de Refuerzo.
5. Reacciones Químicas con los Agregados.

(esquiométricamente $\%Na_2O + 0.658 \%K_2O$). Medida opcional, que se adopta en México en 1975, y que todavía es vigente en la norma oficial mexicana (NOM-C-1-1980), y cuyo uso en la forma propuesta es cuestionable.

La reacción involucra otros factores además de los mencionados, como: proporción del material reactivo presente en el agregado, tamaño de las partículas reactivas (granulometría), temperatura, humedad, la concentración y redistribución de los álcalis del cemento, fisuraciones por contracción debidas a un curado incorrecto, etc.⁹⁷; así, una reducción en el contenido de álcalis a los niveles especificados por las normas no evita el desarrollo de una reacción perjudicial en ciertos casos.

Además, la producción de cementos especiales bajos en álcalis es costosa y no se pueden elaborar en todas las áreas debido a la poca disponibilidad de la materia prima requerida. Las especificaciones en materia ambiental y de conservación de energía han provocado que los álcalis en el cemento aumenten. La necesidad de ahorrar energía en el proceso de fabricación tuvo como consecuencia el uso de precalcinadores o precalentadores, los cuales tienden a incrementar el nivel de álcalis. Una forma de reducir la cantidad de álcalis es desalojando los polvos del horno de

producción, estos polvos tienen un gran contenido de álcalis y al no ser desalojados se incorporan al clínquer nuevamente, pero las normas ambientales obligan a que estos polvos sean recolectados en trampas, y en algunos casos son usados nuevamente como materia prima en el proceso de producción, con la consecuente reincorporación de los álcalis. Así que reducir el nivel de álcalis en el cemento es un proceso difícil y costoso actualmente.

TABLA 2.
a) ROCAS Y MINERALES POTENCIALMENTE REACTIVOS EN EL CONCRETO.

SUSTANCIA O ROCA REACTIVA.	COMPOSICION QUIMICA.	CARACTER FISICO.
Opalos	SiO ₂ * nH ₂ O	Amorfo
Calcedonia	SiO ₂	a) Microcristalino, Criptocristalino. b) Cristalino, pero intensamente fractura, deformado, y/o con inclusiones.
Cristobalita	SiO ₂	Cristalino.
Tridimita	SiO ₂	Cristalino.
Rocas Volcánicas Acidas o Intermedias o Productos de Devitrificación Criptocristalino.	Sílice, con cantidades menores de aluminio, suelos alcalinos y álcalis.	Material Vitrio y Criptocristalino como la Matriz de las Rocas Volcánicas.
Vidrios de Sílice Sintéticos.	Sílice, con cantidades menores de álcalis, aluminio, y/o otras sustancias.	Vidrio.

La reactividad álcali-agregado la clasificamos dentro del tipo 5 de daño al concreto, según la propuesta del Instituto del Concreto de Estados Unidos (ACI, American Concrete Institute) en la Guía para Concreto Durable; la cual propone la clasificación para el daño en el concreto⁰¹ que se presenta en la tabla 1.

Existen diferencias en cuanto a la clasificación que amerita la RAA. Las divisiones corresponden según el tipo de agregado que participa en la reacción con los álcalis, y pueden ser, 1) Reacción Alcali-Sílice, 2) Reacción Alcali-Silicato, 3) Reacción Alcali-Carbonato. Algunos autores⁴⁹ proponen sólo dos tipos: 1) Reacción Alcali-Sílice y, 2) Reacción Alcali-Carbonato; Tang establece que la reacción álcali-silicato es en realidad una reacción álcali-sílice, y que la velocidad de expansión depende del tamaño y defectos de los cristales de cuarzo y de la distribución del cuarzo microcristalino, además sostiene su postura basado en resultados en los que la reacción álcali-sílice y álcali-silicato se detectan con los mismos métodos (Método Rápido en Autoclave, Prueba Acelerada de Barras de Mortero NBR¹⁶⁴); sin embargo, propone que la reacción álcali-sílice se divida en reacción rápida y reacción lenta. De estas, la Reacción Alcali-Sílice (rápida) es la que más se presenta, y la que ocupa la presente investigación.

TABLA 2.
b) ROCAS QUE PRESENTAN LOS MATERIALES DE LA
TABLA 2a. EN CANTIDADES CONSIDERABLES.

1. Rocas Silíceas:

- Pedernal Opalino.
- Pedernal Calcedónico.
- Pedernal de Cuarzo.
- Calizas Silíceas.
- Dolomitas Silíceas.

2. Rocas Silíceas:

- Riolita.
- Latita.
- Dacita.
- Andesitas.
- Esquistos Silíceos.
- Concreciones de Opalo.

3. Algunas Formas de Cuarzo:

- Cuarzo Criptocristalino.
- Cuarzo Microcristalino.
- Cuarzo Cristalino Intensamente Deformado.

El mineral o roca potencialmente reactiva puede estar en el agregado fino o en el grueso, las sustancias más comunes se presentan en la tabla 2a y 2b. Esta sílice inestable o en estado lábil, comprende los estados vítreo, criptocristalino, microcristalino y, cristalino intensamente deformado.

La proporción del agregado reactivo es importante, ya que existen agregados que presentan un potencial más alto con proporciones menores presentes en el concreto que otros; por ejemplo, con un agregado que contenga entre 1 a 5 % de ópalo o vidrio volcánico se pueden causar daños severos; en cambio se requiere entre 35 a 40 % de un material microcristalino o criptocristalino en el agregado, como ciertos cuarzos o calcedonia, para producir daños⁸⁸.

En el desarrollo del conocimiento del fenómeno, se pueden citar las siguientes contribuciones como de particular importancia para la comprensión de la problemática: Thomas Stanton⁶¹ (1940) de Estados Unidos, descubre que algunos agregados reaccionan con los álcalis del cemento y causaban expansiones, -propone el término Reacción Alcali-Agregado-; Swenson (1957) de Canadá, quién identificó la reacción álcali-carbonato; Gillot (1973) descubre la reacción álcali-silicato; Idorn de Dinamarca, quién por primera vez estudia un concreto dañado por la reacción álcali-silice en Europa; y H.E. Vivian de Australia, quién hizo una propuesta para explicar los mecanismos de la reacción^{15, 49}.

1.3. REACCION ALCALI-CARBONATO.

La reacción álcali-carbonato se presenta entre los álcalis del cemento y ciertos agregados de calizas dolomíticas, la expansión de la reacción álcali-carbonato es similar a la que presenta la reacción álcali-silice. Con frecuencia se forman zonas de reacción del orden de 2 mm alrededor de las partículas reactivas de agregado. En esos contornos se desarrollan grietas que forman redes de agrietamiento y ocasionan pérdida de adherencia entre el agregado y la pasta de cemento¹⁷.

Las investigaciones en este tipo de reacción han demostrado que se presenta la desdolomitización, pero todavía no se conocen bien las reacciones que intervienen; especialmente la función de la arcilla en el agregado no ha quedado bien clara, pero la reacción expansiva parece estar casi siempre relacionada con la presencia de arcilla. Asimismo, los cristales de dolomita y calcita son muy finos en los agregados expansivos. Se ha sugerido que la expansión se debe a la captación de humedad por parte de la arcilla que antes estaba seca, en cuyo caso la desdolomitización sólo es necesaria para proporcionar acceso a la humedad hasta la arcilla aislada; otra sugerencia es que la arcilla incrementa la reactividad del agregado por lo que la dolomita y el hidrato de silicato de calcio producen $Mg(OH)_2$, gel de sílice y carbonato de calcio con un aumento de volumen de aproximadamente cuatro por ciento.

Solamente algunas calizas dolomíticas causan reacciones expansivas en el concreto. No se han llevado a cabo todavía pruebas sencillas para identificarlas; en caso de duda, se puede obtener ayuda de una investigación de la textura y la expansión de las rocas en hidróxido de sodio o cuando se usen en vigas de prueba hechas con cementos que tengan un alto contenido de álcalis.

Una diferencia que debe recordarse entre las reacciones álcali-silíce y álcali-carbonato es que en esta última se regeneran los álcalis. Posiblemente por esta razón las puzolanas no son efectivas para controlar la expansión álcali-carbonato. Las rocas con carbonato reactivo no son muy comunes y, por lo general, se pueden evitar.

1.4. REACCION ALCALI-SILICE.

Desde su detección el fenómeno se estudia de manera intensiva en diferentes países, Austria, Inglaterra, Francia, Nueva Zelanda, Sudáfrica, China, Canadá, E.U., Argentina, etc., y otros países en desarrollo, donde se han detectado estructuras dañadas por la reacción álcali-silíce. Lo anterior, dentro de otros factores, se debe al incremento del consumo de cemento por metro cúbico de concreto y el aumento de la construcción con concreto.

Actualmente el conocimiento del fenómeno se encuentra avanzado, especialmente en la identificación de los agregados reactivos, los mecanismos de la reacción, y métodos de diagnóstico de la reactividad; si bien el proceso de la reacción no está totalmente explicado, existen avances importantes. El rumbo de las investigaciones están enfocadas regionalmente, es decir, los investigadores e instituciones que analizan la reactividad álcali-agregado dirigen sus esfuerzos más hacia el conocimiento de ciertos materiales particulares -aquellos que se presentan en sus países (Canadá, Inglaterra, Sudáfrica, Australia, España, Japón, y otros)- y métodos de detección, que a un estudio más amplio de colaboración a nivel internacional. Por lo anterior los métodos de detección se han multiplicado, además porque algunos métodos de detección de la reactividad ya establecidos no identificaban materiales que presentaban expansión, o clasificaban como inocuos a materiales que en la práctica habían causado deterioro por expansiones debidas a la reacción.

Cabe señalar que ninguno de los métodos de detección o pruebas ofrecen una seguridad al cien por ciento de detectar la reacción o predecir el comportamiento del agregado, siempre existen limitaciones para cada prueba, tampoco se puede asegurar con una prueba que el agregado que se esté probando tenga un comportamiento nocivo bajo las condiciones reales de uso y medio ambiente al cual estará expuesto; todas y cada una de la pruebas ofrecen líneas de acción y califican a los agregados como "potencialmente" reactivos o "susceptible" de presentar expansiones,

dejando al especialista la decisión final para determinar un diagnóstico definitivo. Lo adecuado es proceder de acuerdo a una secuencia de investigación estructurada para que mediante el proceso, sea factible, de forma integral, dar una opinión o tomar una decisión más objetiva sobre el agregado⁵², ya que una decisión mal realizada causa pérdidas económicas considerables, ya sea, por rechazar un agregado que no tenga un mal comportamiento en la práctica, aceptar otro que se comporte inadecuadamente, y con esto recomendar el uso de cementos especiales bajos en álcalis, sustancias inhibidoras de la reacción (aditivos especiales), etc.

1.4.1. Mecanismo de la Reacción Alcali-Sílice.

El mecanismo de la reacción álcali-sílice no se tiene completamente entendido en la actualidad, pero con objeto de presentar una explicación actual, se presenta de manera general el mecanismo básico de la reacción álcali-sílice, con algunos comentarios sobre aspectos relacionados con esta.

Para que la reacción se lleve a cabo se requieren tres componentes esenciales: los álcalis, a saber, hidróxido de sodio, de potasio y de calcio, productos de la hidratación del cemento; una forma de sílice reactiva presente en el agregado; y agua, que sature al concreto. Los agrietamientos o expansiones son el resultado de la fuerza ejercida por el aumento de volumen debido a la absorción de agua por los productos de la reacción de los álcalis con las partículas reactivas del agregado, que se encuentra completamente cubierto por la matriz endurecida (pasta de cemento) en la que se producen las microfisuras inicialmente⁵³.

La fuente de álcalis no es exclusivamente el cemento, pueden provenir de otras, como: álcalis en el suelo, sales, aditivos, e incluso los mismos agregados^{25, 52}.

El proceso de la Reacción Alcali-Sílice (RAS) que ocasiona daños en las estructuras se puede enunciar en 4 etapas significativas²⁴, si bien en una estructura se pueden presentar al mismo tiempo las diferentes etapas de la reacción:

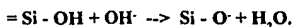
- (1) Desarrollo de altas concentraciones de hidróxidos alcalinos en la solución de poro.
- (2) Reacción con el agregado y formación de gel.
- (3) Expansión, provocada por absorción de agua por el gel.
- (4) Fisuración, deterioro de la estructura o del elemento.

En la primera etapa de la reacción existen altas concentraciones de hidróxidos alcalinos, estas concentraciones no son uniformes en todo el elemento y mucho menos en la estructura; por lo tanto, se presentan gradientes en la concentración de álcalis⁴⁴. Si la disponibilidad de álcalis no es uniforme en la masa de concreto, explica el hecho que la reacción tampoco sea uniforme en las estructuras y presente diferentes etapas en concretos de la misma edad y con los mismos agregados. Los hidróxidos alcalinos se presentan en función del contenido total de álcalis en el cemento²⁴. Tal relación se piensa que es lineal, cuando menos en condiciones donde no existe aportación de álcalis de otras fuentes y para relaciones agua-cemento constantes. La concentración de los hidróxidos alcalinos es importante porque son una medida del potencial de expansión, que en un momento dado, se puede presentar -al menos localmente- en el concreto, ya que son componentes esenciales en la reacción.

En la segunda etapa se lleva a cabo la reacción con el agregado y los álcalis. Esta etapa es motivo actualmente de discusiones, especialmente sobre el papel que juega el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la reacción. Los dos postulados más importantes sobre este concepto son los que proponen por un lado, Powers y Steinour (recientemente Wang y Gillot adoptan esta misma tesis⁶⁹), y por otro, Chatterji^{9, 10, 11, 12}. Se exponen los dos puntos de vista en forma resumida más adelante.

En el inicio de la reacción los iones hidróxidos penetran a las partículas reactivas, la velocidad de penetración depende del tamaño de los iones en solución¹³. La rapidez de este proceso es determinada por la concentración local de álcalis y de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, entre mayor sea la concentración mayor es la rapidez.

No es claro el proceso por el cual los hidróxidos alcalinos reaccionan con la sílice amorfa, Den Glasser & Kataoka²² proponen que este proceso se puede dividir en dos fases; en la primera los iones OH^- en solución reaccionan con los grupos Si-OH (Silanos) de la sílice reactiva, estos grupos han sido encontrados por diferentes investigadores, Regourd-Moranville⁶³, Dent Glasser & Kataoka²², A. B. Poole⁷⁰.



La carga en las terminales de oxígeno es balanceada por los iones Na^+ , K^+ y Ca^{+2} que se encuentran disponibles sobre la estructura de la partícula reactiva. Los iones OH^- se distribuyen sobre la sílice ya sea en los "huecos" de su estructura o en la superficie. El acceso de los iones OH^- y de los cationes Na^+ y K^+ dentro de la partícula esta limitado por el tamaño de los espacios en la estructura de la sílice y de la distancia a la cual se encuentren de la superficie de la partícula reactiva. En la segunda fase los iones OH^- alcalinos rompen los enlaces Si-O-Si (siloxano) de la estructura de la sílice⁷⁰.



El rompimiento de la estructura lleva a la formación de un polímero "gel álcali-sílice". La composición del gel analizado por diferentes autores se presenta en la tabla 3.

TABLA 3. RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICOS DEL GEL ALCALI-SILICE DESARROLLADOS POR DISTINTOS INVESTIGADORES.							
Na2O	K2O	SiO2	CaO	MgO	Diferencia (%)	Investigador	Año
12.9	0.0	53.9	2.9	0.6	29.7	Stanton	1942
12.9	0.0	53.4	2.6	0.8	30.3	"	"
14.9	5.2	61.7	0.6	0.0	17.6	"	"
13.4	5.1	65.5	0.5	0.2	15.3	Idorn	1962
9.4	4.1	72.8	1.3	0.2	12.2	"	"
14.6	6.2	61.9	0.0	0.1	17.2	"	"
16.2	5.7	58.8	0.0	0.0	19.3	"	"
8.3	5.0	28.5	22.4	0.2	35.6	"	"
1.2	0.4	51.4	29.9	10.0	7.1	"	"
1.5	13.9	38.9	27.3	0.0	16.4	Hobbs	1980
1.5	13.9	39.9	27.3	0.0	17.4	Peteler, Nixon	1980
0.4	4.7	51.1	21.3	0.0	22.5	Regourd	1983
0.0	0.6	27.9	35.2	0.0	36.3	"	"
1.0	6.9	61.5	9.2	0.0	21.4	Oberholster	1983
1.0	8.9	53.8	8.2	0.0	30.1	"	"
1.8	5.5	49.9	12.8	0.0	30.0	"	"
1.0	5.2	50.4	12.0	0.0	31.4	"	"
1.4	9.0	62.9	12.5	0.0	14.2	"	"
0.8	7.4	62.9	10.0	0.0	26.6	"	"
1.2	4.1	66.5	6.5	0.0	21.7	Baronio	1983
3.7	12.9	43.3	21.5	0.8	17.6	Mullick	1986
3.9	11.4	48.4	15.9	0.5	18.9	"	"
1.8	1.4	60.2	16.1	0.0	0.5	S. Chatterji	1986
1.8	2.8	69.4	23.6	0.0	2.4	"	"
0.4	4.3	65.7	15.3	0.0	14.3	Natesaiyer	1989

En la tercera etapa del mecanismo de la reacción se inicia la absorción de H₂O. La forma en la que los iones de OH⁻ y Na⁺ se mueven hacia la partícula de sílice reactiva es función de la naturaleza higroscópica -afinidad por H₂O- del gel producido por la reacción (French). Diamond²⁴ señala que este proceso es un aspecto colateral de la absorción de H₂O por el gel previamente formado. Es decir, el transporte de OH⁻ y álcalis disueltos hacia las zonas de reacción es por los flujos de H₂O hacia el gel, generados por el mismo gel.

Los cationes álcalis se rodean de moléculas de agua, el catión K^+ tiene un promedio de 5.4 moléculas de H_2O , el catión Na^+ tiene 8.4, y el catión Ca^{+2} tiene 24.0 (A.B. Poole⁷⁰; Chatterji et al¹³). Se infiere de lo anterior, que los cationes de Ca^{+2} tienden a permanecer en la superficie del gel en desarrollo como C-H-S-este producto puede ser observado en las grietas, vacíos (huecos) y a veces en áreas protegidas de las estructuras de concreto- hasta que los "huecos" sean suficientemente grandes para penetrar, y así, desplazar a los iones de K^+ y Na^+ más pequeños y previamente adheridos. Los iones alcalinos pueden ser fácilmente removidos del gel simplemente por lavado, esto sugiere que no están unidos firmemente a la estructura del gel (A.B. Poole⁷⁰; Davies & Oberholster⁸⁵; Chatterji, Thaulow & Jensen⁹). Lo anterior regenera la concentración de álcalis en la solución de poro, y permite que la reacción continúe, este hecho no se acepta de manera general; por otro lado, el gel se satura de iones de calcio y disminuye la capacidad para absorber agua, aumentar de volumen y producir presiones.

El papel del $Ca(OH)_2$ es de mucha discusión actualmente, se pensaba que su presencia en la reacción era irrelevante o secundaria-H.E. Vivian⁸⁸-, actualmente se sabe que es un compuesto importante en el desarrollo de la reacción, y se ha demostrado que en ausencia de $Ca(OH)_2$ no se producen expansiones deletéreas en el concreto. Chatterji et al. propone que el ataque a la sílice por los iones de OH^- se acompaña de cationes de K^+ , Na^+ , Ca^{+2} , la prioridad de tal penetración es función del tamaño de los átomos, es decir, primero penetran los iones OH^- por ser más pequeños, siguen los cationes K^+ y Na^+ , y después los cationes Ca^{+2} , pero finalmente todos penetran a la partícula reactiva. Bajo el ataque de los hidróxidos algunas moléculas de sílice son disueltas de la partícula. La concentración de Ca^{+2} controla la velocidad a la cual la sílice es disuelta, entre más alta sea la concentración de Ca^{+2} menor es la sílice disuelta y aumenta la cantidad de hidróxidos y de álcalis que penetran a la zona de reacción. La expansión ocurre cuando la cantidad de material (e.g. K^+ , Na^+ , Ca^{+2}) que penetra a la partícula de sílice es mayor que la cantidad de sílice que se disuelve y sale de la zona de reacción; es decir, la proporción de $Ca(OH)_2$, controla la razón de dispersión de materiales hacia dentro y fuera de la zona de reacción. En conclusión, el $Ca(OH)_2$ es indispensable para que los cationes de Na^+ y otros iones penetren a la partícula reactiva, y al mismo tiempo "sellar" la zona de reacción y evitar que la sílice disuelta se pierda por lixiviación. Otros autores han comprobado lo anterior²⁴.

En el mecanismo que proponen H. Wang y J.E. Gillot la reacción comienza con la penetración de los OH^- en la partícula de la sílice reactiva, a continuación se lleva a cabo el rompimiento de los enlaces de siloxano causado por los OH^- , lo que ocasiona un intercambio iónico de los cationes de K^+ y Na^+ por protones de los grupos silanos y se produce un compuesto álcali-sílice, el cual tiene una alta afinidad por H_2O , lo que a fin de cuentas ocasiona las expansiones. La expansión y posterior creación de fisuras permite que se lleve a cabo un intercambio iónico de los

cationes de K^+ y Na^+ previamente absorbidos, por los iones de Ca^{2+} , lo que produce un compuesto álcali-sílico-calcáreo que no se expande -esta es la diferencia con el postulado de Chatterji, el cual no acepta la tesis del producto álcali-sílico-calcáreo no expansivo-. A pesar de que el compuesto álcali-sílico-calcáreo no absorbe agua, provoca que en el intercambio iónico se liberen los cationes de K^+ y Na^+ , los cuales participan en la formación de nuevos compuestos álcali-sílice, es decir, regeneran la reacción. En resumen, las concentración de $Ca(OH)_2$ en el mecanismo propuesto por Wang & Gillot, controla el tipo de producto de la reacción, ya sea un compuesto álcali-sílice "gel" que absorbe agua, con la posterior expansión, o un compuesto álcali-sílico-calcáreo que es "estable".

Por último en la cuarta etapa se presentan microfisuras en la pasta que rodea a la partícula reactiva. La viscosidad del gel es importante en el desarrollo de las grietas⁷⁰. Los factores que influyen en la viscosidad son: la estructura y composición del gel, temperatura y contenido de agua. Algunos de estos agrietamientos se propagan y amplían tanto como los productos de la reacción se dilatan. Si continúa la saturación del gel, este se disuelve, y los productos son forzados a llenar las fisuras y grietas, por la lixiviación del gel. Por lo tanto, el proceso de la expansión llega a un máximo cuando existe el suficiente agrietamiento y disolución de la sílice para que los productos de la reacción se ubiquen en las cavidades que dejan las partículas y en los espacios creados por el agrietamiento.

1.4.2. Aspectos Relacionados con la Reacción Alcali-Sílice.

a. *Expansion.*

La expansión es la primera causa de daño en el concreto producto de la reacción, numerosos y amplios estudios sobre el tema se han realizado desde que se conoce el fenómeno. Sin embargo, existen dos puntos que se deben mencionar; primero, la mayoría de las investigaciones publicadas se refieren a estudios en barras de mortero más que en elementos de concreto. Si bien los resultados pueden ser extrapolados -con ciertas limitaciones-, el concreto se comporta de manera diferente a las barras de mortero en muchas de sus propiedades mecánicas, y no hay siempre una correlación entre los dos, el contenido mayor de cemento en las barras es una importante diferencia. Segundo, la información disponible se basa en estudios donde el material reactivo es ópal o un material vítreo triturado. La reacción con estos materiales es muy rápida y dificulta el seguimiento del proceso y sus efectos en los elementos. Por último, existe poca información de estructuras afectadas por la reacción donde se lleve a cabo un seguimiento de la variación en sus propiedades mecánicas.

El tiempo en que ocurre la expansión y la magnitud máxima en condiciones de humedad se presenta más rápido a temperaturas mayores que la ambiente (aparentemente la temperatura más desfavorable es entre 38 y 40 °C), pero así mismo la expansión cesa antes. Lo anterior puede explicar el hecho que en lugares con temperatura ambiente baja la reacción progresa de forma lenta pero suele ser más perjudicial que en lugares cálidos donde las expansiones se presentan a edades tempranas, pero suelen ser menores. El contenido de álcalis y de cemento influyen en la magnitud de la expansión³⁷. Para cada tipo de cemento y proporción en el concreto, aumenta la expansión con el incremento del mismo, pero no en la misma proporción⁵².

Se han hecho intentos para cuantificar la expansión de forma analítica, lo cierto es que tales esfuerzos están lejos de ofrecer resultados confiables dado el gran número de variables que intervienen en el proceso y que su influencia no se explica de manera sólida aún. D. W. Hobbs³⁴ en sus estudios sobre la expansión producto de la reacción álcali-silíce presenta una teoría simple para calcular la expansión por medio de expresiones matemáticas -la teoría no se aplica para la reacción álcali-silicato o reacción lenta-, que depende de la cantidad de material reactivo remanente " R ", en cualquier tiempo " t " de la reacción, y está dado por la expresión: $e = k_2 R [\exp(-3k_1 t) - \exp(-k_1 t)]$, donde k_1 y k_2 son constantes que dependen del elemento y del material que lo constituye.

b. Contenido de Cemento y Alcalis.

No existe un criterio único en cuanto al contenido de cemento y de álcalis que pueden usarse para controlar la expansión, cada caso es particular y no se puede tomar uno solo como criterio para la reactividad de los materiales que se usen en las estructura, se pueden presentar daños con un contenido de álcalis tan bajo como 2.5 kg/m³ con ciertos agregados. Cuando existen fuentes externas de álcalis -otras además de la presente en el cemento-, la expansión se incrementa; pero si el contenido de álcalis en el concreto es alto 5 kg/m³ aproximadamente la influencia de fuentes externas de álcalis parece ser mínima.

La cantidad de álcalis presentes en el cemento y la cantidad de componentes reactivos en los agregados afectan la magnitud de la expansión. Cuando la cantidad de álcalis presentes en el cemento se encuentra abajo de 0.60 % (expresado como Na₂O equivalente) la reacción decrece progresivamente y el tiempo requerido para que la expansión llegue a ser perjudicial aumenta. Si se acepta la tesis de regeneración del gel, el beneficio de las puzolanas para "inhibir la reacción" es realmente un retraso de la etapa perjudicial de la reacción.

c. Otros Productos de la Reacción.

En la zona de reacción existe la presencia de productos cristalizados de diferente composición y morfología. Varios autores han reportado en sus estudios la presencia de estos productos, que son de gran variedad. La importancia o el papel de estos productos en el proceso del deterioro de las estructuras por la reacción no es preciso, ni tampoco su participación en el mecanismo de la reacción; se piensa que son productos secundarios de cristalización del gel, que una vez formados no contribuyen al incremento de la expansión y/o agrietamiento.

Larive y Louarn⁴⁴ estudiaron 19 puentes en el Norte de Francia afectados por la reacción álcali-silice, en diferentes etapas de desarrollo de la misma, además estudiaron las correlaciones de estos productos con la apariencia, localización, composición de los productos, materiales de

TABLA 4. CLASIFICACION DE LOS PRODUCTOS DE LA REACCION.

a) Amorfos (Amorphous): La superficie presenta un aspecto gelatinoso, a x5000 ampliaciones, con agrietamiento producto de la desecación.	
Gel Suave (Smooth Gels)	Superficie regular, lisa, y pueden aparecer en varias capas de diferente espesor
Gel Aglomerado (Bump Shaped Gels)	Superficie Irregular, el espesor no es mayor a 10 micras, pero en casos excepcionales alcanzan 70 micras
b) Semi-organizados (Semi-Organized Products)	
Productos Poliformes (Polymorphous Products)	Son en gran parte amorfos con pequeños cristales incluidos (menores a 10 micras) esparcidos en la superficie de forma: laminar, racimos, apifados, entrelazados.
Productos Botryoidales (Botryoidal Products)	Consisten en esferas (diámetro menor a 10 micras) difíciles de observar a x5000 ampliaciones.
Productos Microgranulares (Microgranular Products)	Consisten en cristales que se desarrollan comúnmente sobre una capa de productos amorfos. Se observan con dificultad a x3000 ampliaciones o más.
c) Productos Cristalizados (Crystalized Products)	
Cristales Laminares (Lamellar crystals)	Láminas individuales (5 micras en promedio)
Cristales en forma de roseta (Rosette like-crystals)	Agrupación de cristales laminares.
Cristales Aciculares (Acicular crystals)	Cristales en forma de espiga muy finos y cortos, menores a 10 micras.

construcción, edad, y tipo de la estructura. Clasificaron a estos productos cristalizados en las siguientes categorías: 1) Amorfos, se presentan en forma de un gel uniforme y como gel con protuberancias; 2) Semi-organizados, estos se observan como productos poliformes, productos botryoidales, y productos microgranulares; y, 3) Cristalizados, estos son cristales laminares, cristales en forma de roseta y cristales aciculares; en la tabla 4 se presenta la clasificación. Cabe mencionar la heterogeneidad de estos productos cristalizados, y que se pueden presentar varias formas al mismo tiempo en una zona muy pequeña de la reacción, o superpuestos, por lo que la clasificación es difícil y no muy precisa. Sin embargo algunas formas son más comunes que otras, como por ejemplo el gel uniforme o los cristales en forma de roseta. Es común que se presente una transición de gel a productos cristalizados en la interfase entre la pasta y el agregado, de la siguiente forma: en el contacto con la pasta un gel uniforme, cambiando a un gel con protuberancias, después una zona donde se presentan algunos cristales sobre el gel amorfo y finalmente la presencia de cristales bien definidos en el contacto con el agregado. Lo anterior sugiere la evolución del gel, de un gel amorfo a uno cristalizado⁴⁴.

d. Humedad y Ciclos Climáticos.

El origen del agua que participa en la reacción, puede ser exceso del agua de mezclado u otras fuentes -suelo o de lluvia-. La absorción de agua es el factor crítico que causa la expansión. Consecuentemente el concreto que se seca y se mantiene seco no se expandirá de manera significativa, y en efecto, se contraerá. Se ha mencionado que los elementos de concreto susceptibles de presentar la RAS no la desarrollarán si la humedad relativa no sobrepasa de 75%⁴². Un concreto expuesto a un flujo externo de agua es probable que pierda álcalis por lixiviación, y así, reducir la expansión. Rocas de baja densidad, e.g. pumita (piedra pómez), escoria, concretos de bajo contenido de cemento y cementos pobremente compactados no se expanden generalmente. Solo los concretos bien compactados, de buena calidad se expanden de manera anormal. La absorción mayor de agua en la partícula se lleva a cabo en su superficie externa y disminuye con la profundidad dentro de la ella. El cambio volumétrico de la partícula reactiva así como el agua es absorbida no es uniforme y además los cambios en las propiedades físicas que lo acompañan no son uniformes igualmente. Relacionado con la humedad, los cambios cíclicos de esta, es decir, temporadas de humedad y sequía afectan la magnitud y rapidez del desarrollo de la RAS, debido a que pueden provocar una concentración de álcalis en ciertas partes de la estructura -en las zonas más secas- e iniciar la reacción

e. Tamaño de las Partículas Reactivas.

En cuanto a la influencia del tamaño de las partículas en la formación del gel álcali-sílice existen dos procesos del mecanismo que determinan su participación de acuerdo a investigaciones realizadas con un material opalino (Hobbs & Gutteridge²⁹). El primero es la reacción química entre

el agregado y los hidróxidos; y segundo, la velocidad de difusión de los hidróxidos a los lugares de reacción. Por lo tanto, cuando la reacción se produce en la superficie del agregado, la superficie disponible es menor cuanto mayor sea el tamaño de la partícula, de esta manera la velocidad de formación del gel disminuye. Si la reacción se lleva a cabo no solo en la superficie sino también dentro de la partícula (poros y fisuras), la velocidad de la reacción es independiente del tamaño de la partícula, si es la reacción química la que controla el proceso; pero dependerá del tamaño de la partícula si es la difusión de los hidróxidos lo que controla el proceso de reacción.

Es decir, si la reacción se presenta en la superficie del agregado, la cantidad de gel que se forma dependerá del tamaño del agregado, por lo que influirá en el tiempo en que se presenten las grietas. Por otro parte, cuando la reacción se presenta dentro de los poros del agregado y el movimiento de los hidróxidos hacia los lugares de reacción es alto, la formación del gel depende de la proporción de los minerales reactivos presentes, y no del tamaño del agregado.

Otros aspectos interesantes que presentan Hobbs y Gutteridge en sus investigaciones es que para una proporción determinada de agregado el tiempo en que se presentan las grietas es independiente del tamaño de la partícula, y la expansión se incrementa así como el tamaño de las partículas disminuye, dentro de ciertos rangos.

No existe mucha información sobre la influencia del tamaño de la partícula utilizando otro tipo de material -además de ópalo- para llevar a cabo la reacción, los estudios llevados a cabo en laboratorio para analizar la influencia del tamaño de las partículas en la formación del gel y la expansión involucran en su mayoría ópalo en alguna de sus formas.

f. Efecto en las Propiedades Mecánicas.

El efecto de la expansión producida por la RAS en las propiedades mecánicas del concreto es variable, dependiendo del tipo de agregado, la proporción de la mezcla, del tipo de ensaye que se utilice para medir el parámetro deseado, etc. Poca información existe de la variación con el tiempo de las propiedades del concreto en estructuras afectadas por la RAS, tampoco se han realizado en laboratorio muchos estudios de lo anterior.

R.N. Swamy y M. Al-Asali⁵³ estudiaron las propiedades que se ven afectadas en el concreto por la expansión de la RAS, un resumen se presenta en la tabla 5. Los ensayos se llevaron a cabo en prismas de concreto de 75x75x300 mm, el concreto tuvo una proporción 1:1.125:2 de cemento, arena y grava respectivamente, una relación agua cemento de 0.44, cemento tipo I con un contenido de álcalis de 1% expresado como NaOH equivalente. Se prepararon 3 series de especímenes, una

TABLA 5. EFECTO DE LA RAS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.

PRUEBA	MATERIAL	EDAD (Días)							
		1	2	3	7	10	28	100	365
Expansión (%)	Control	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.017	0.021
	4.5% A	0.000	0.000	0.004	0.071	0.097	0.316	0.883	1.844
	15% B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.023	0.259	0.623
Resistencia Compresión (N/mm ²)	Control	26.7	—	44.2	48.6	—	60.1	61.9	73.5
	4.5% A	31.1	—	39.9	44.4	—	44.5	39.9	27.5
	15% B	0.0	38.5	—	—	50.2	52.4	50.5	44.5
Resistencia Tensión (N/mm ²)	Control	2.61	—	3.23	3.58	—	3.90	4.26	4.29
	15% B	—	2.81	—	—	3.67	3.29	—	1.83
Módulo de Ruptura (N/mm ²)	Control	3.52	—	4.24	4.88	—	5.25	5.37	5.58
	15% B	—	3.84	—	—	5.30	4.58	1.83	1.30
Módulo Dinámico de Elasticidad (kN/mm ²)	Control	35.593	38.054	38.818	41.034	41.119	42.510	44.193	45.400
	4.5% A	33.846	36.301	37.488	32.720	23.720	20.801	19.550	10.415
	15% B	—	37.032	—	39.479	40.171	40.801	24.013	18.883
Ultrasonido (km/sec)	Control	4.28	4.48	4.55	4.60	4.64	4.67	4.71	4.78
	4.5% A	4.12	4.27	4.32	4.02	3.70	3.48	3.29	2.70
	15% B	—	4.45	—	4.57	4.59	4.61	3.80	3.64
A. Ópalo		B. Silice Fundida.							

serie de control (sin material reactivo), otra con 4.5% de ópalo y la última con 15% de silice fundida. En la tabla 6 se presenta una comparación de los resultados de las pruebas de las propiedades mecánicas en los cilindros respecto de la prueba ASTM C227 para los límites de 0.05% y 0.10%.

La pérdida de las diferentes propiedades y parámetros del concreto (compresión, tensión, módulo de elasticidad, módulo de ruptura, etc.) no se presentan con la misma rapidez, ni en la misma proporción con la que ocurre la expansión a una edad determinada. La rapidez en la disminución de las propiedades resulta de la interacción de dos aspectos, los efectos de la expansión y la continua hidratación del concreto.

La resistencia a compresión inicialmente aumenta para los especímenes con ópalo y sílice fundida, pero conforme se presenta el aumento en las expansiones comienzan a presentar pérdidas graduales, hasta que se detecta una ligera recuperación. Esta recuperación en la resistencia a compresión se debe a que el cemento continúa hidratándose. La pérdida en la resistencia a

TABLA 6. PROPIEDADES DEL CONCRETO EN RELACION CON LOS LIMITES DE LA PRUEBA ASTM C227.

PROPIEDAD DEL CONCRETO	LIMITES DE EXPANSION							
	0.05 %				0.10 %			
	Opalo		Sílice Fundida		Opalo		Sílice Fundida	
	Valor a 0.05% de Expansión	Pérdida (%) *	Valor a 0.05% de Expansión	Pérdida (%) *	Valor a 0.05% de Expansión	Pérdida (%) *	Valor a 0.05% de Expansión	Pérdida (%) *
Tiempo (días)	6	—	40	—	8	—	60	—
R. Compresión (N/mm ²)	43.6	9.2	53.5	12.3	44.5	11	54.5	11.4
Módulo de Ruptura (N/mm ²)	—	—	3.7	29.9	—	—	2.75	48.3
R. Tensión (N/mm ²)	—	—	3.2	27.1	—	—	2.95	28.9
Módulo Dinámico (N/mm ²)	34.0	15.5	38.0	11.1	28.0	38.7	34.5	20.3
Ultrasonido (Km/sec)	4.08	7.2	4.5	2.1	3.95	11.2	4.35	5.8

* Pérdida respecto de los cilindros de control a la misma edad.

compresión de los prismas con ópalo fue de 54 % a los 28 días y 63% a un año comparado con los especímenes de control. Los prismas elaborados con sílice fundida resultaron con pérdidas de 26 % y 39% a 28 días y un año, respectivamente.

Las diferencias en el desarrollo de resistencia a edad temprana de los especímenes con material reactivo y los de control, indican que el tiempo que tarda en presentarse la reacción es importante, ya que de este dependerá que el concreto madure y complete su hidratación antes que los efectos nocivos de RAS se presenten.

La resistencia a la tensión se ve afectada aún cuando ocurren deformaciones pequeñas, del orden de 0.005% -a pesar de existir grietas o fisuras-, lo mismo ocurre con el módulo de ruptura. A 28 días la disminución es de 16% y 13% con respecto a los prismas de control, para la tensión y módulo de ruptura respectivamente. El módulo dinámico de elasticidad del concreto se ve afectado -al igual que otras propiedades- por la expansión de la RAS, y presenta un comportamiento similar a la disminución de la resistencia a tensión, solo que es aún más sensible a la expansión. Así, el módulo dinámico puede ser un ensayo que ofrezca una manera de seguir el comportamiento de estructuras afectadas por la RAS.

CAPITULO II.

DIAGNOSTICO DE LA REACCION ALCALI-SILICE Y METODOS EXISTENTES PARA SU IDENTIFICACION.

Sinopsis:

La información más confiable y veraz de una potencial reacción álcali-silíce entre los agregados y la solución de poro del concreto se basa en el conocimiento del comportamiento que ha tenido el material en estructuras existentes. Sin embargo, si no existe la información o se juzga poco confiable por diversas razones, se deben realizar ensayos de laboratorio a los agregados. En este capítulo se describe la forma de realizar un diagnóstico en estructuras que presentan la RAS, además se tratan y discuten los métodos de ensaye más utilizados en la actualidad para evaluar la reacción álcali-silíce en los agregados para el concreto; se mencionan sus ventajas y desventajas. A la fecha sólo algunos métodos son considerados estadísticamente confiables para ser utilizados en la mayor parte de los materiales usados como agregados para el concreto. Por consiguiente, tener una metodología para realizar un juicio sobre el agregado es importante, se presentan algunas de las propuestas de diagramas de decisión para la evaluación de agregados en diferentes países. Es importante aclarar que estos diagramas están diseñados para condiciones muy particulares de la experiencia sobre la RAS que ha tenido el país que la propone, y puede, en un momento dado, no aplicarse a los agregados encontrados en otros países.

2.1. ANTECEDENTES.

Dos puntos de vista se consideran en este capítulo, el primero relacionado con el diagnóstico de la reacción en estructuras que se sospeche presenten o puedan presentar en el futuro daños por la expansión debida a la reacción y, en segundo término, la evaluación de agregados cuyo comportamiento en el concreto pueda provocar expansiones por reacción álcali-silíce. El diagnóstico de la RAS no es un proceso sencillo ni fácil de realizar, los ensayos y procedimientos para hacer un juicio sobre el comportamiento de un agregado que se sospeche reactivo y/o el desempeño futuro

de una estructura afectada por la reacción, requieren de personal capacitado y con experiencia en el fenómeno, además de una metodología precisa para guiar la evaluación e interpretación de los datos y resultados obtenidos.

2.2. DIAGNOSTICO DE LA RAS EN LAS ESTRUCTURAS.

El producto de la RAS es un gel álcali-sílice, y su presencia en el concreto es evidencia de la reacción, pero no siempre es visible y fácil de detectar. El agrietamiento causado por la expansión del gel aunque sigue un patrón definido en ciertos casos, también puede producirse por un sinnúmero de factores distintos, como: esfuerzos por temperatura, contracción por secado, congelamiento, hundimiento del terreno, etc. Además el agrietamiento es frecuente que lo provoque uno o más de los factores mencionados, haciendo más difícil determinar cual es la causa principal del deterioro. En ocasiones las estructuras afectadas por la RAS presentan manchas blanquecinas en la superficie, o en el contorno del agrietamiento, lo cual es un indicio de RAS, pero no es concluyente. Es decir, no existe ninguna característica producto de la reacción álcali-sílice que se considere definitiva para asegurar que los daños en una estructura fueron causados por la reacción.

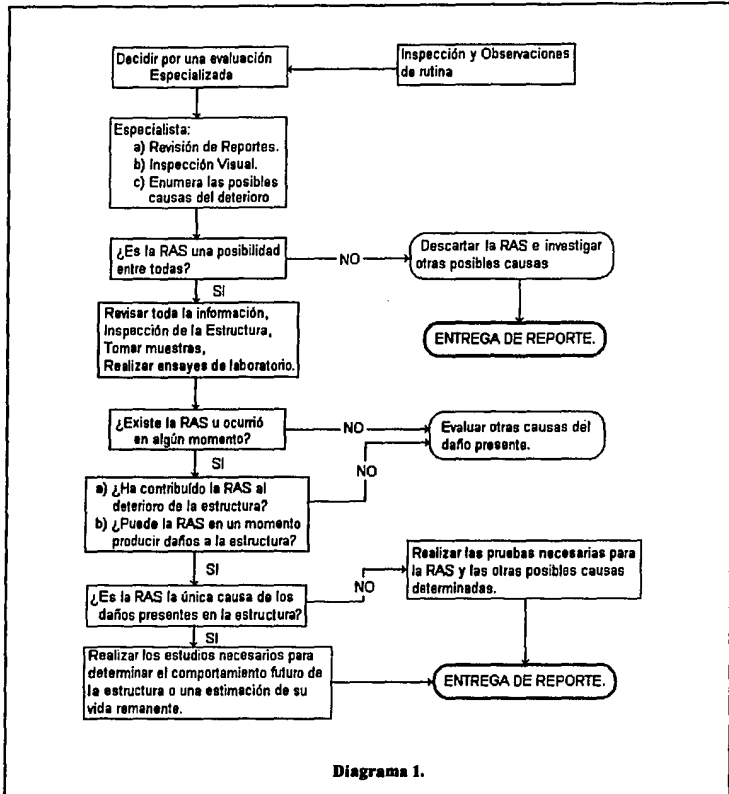
Una secuencia adecuada para hacer el diagnóstico incluye los siguientes pasos (ver diagrama 1)⁹²:

1. Estudio de la información disponible, inspección de la estructura, evaluación de la información obtenida para determinar si son necesarios los ensayos de laboratorio, pruebas de campo o instrumentación.
2. Tomar las muestras para los ensayos de laboratorio. Realizar las pruebas de campo e instrumentación, si se requieren.
3. Realizar los ensayos de laboratorio.
4. Interpretación de los resultados de la inspección de la estructura junto con las pruebas de laboratorio y realizar el diagnóstico.

2.2.1. Inspección de la Estructura.

Con la inspección de la estructura no se puede afirmar que existe RAS, pero tampoco la puede descartar. El muestreo y los ensayos de laboratorio son necesarios antes que una interpretación definitiva se realice. El objetivo de la inspección de la estructura es determinar si existe algún rasgo característico de la RAS, o se encuentran otros. De esta forma se puede planear y detallar el programa de posteriores inspecciones y ensayos de laboratorio.

La inspección debe ser sistemática y lo más completa posible, no se debe dar una atención excesiva a aquellas áreas obvias que presenten más daño, muchas veces la causa no se encuentra en esas áreas. Sin embargo, hay sitios importantes en donde se debe de poner atención particular, como las partes estructuralmente críticas, o aquellas sujetas a condiciones de carga muy particulares o severas, etc.



Algunas partes de la estructuras no son visibles, como la cimentación, o elementos cubiertos por plafón o revestidos, para detectar indicios de la RAS, en estos casos se pueden observar otros rasgos en esos sitios como: asentamientos, erupciones o cualquier otra irregularidad, lo anterior junto con observaciones de las zonas de fácil acceso ayudan a determinar si existen áreas de difícil acceso que se necesiten descubrir para explorarlas.

A pesar de que la RAS puede disminuir la vida útil de la estructura, es importante tener presente en la evaluación que en ciertas circunstancias otros problemas pueden ser más importantes a corto y largo plazo.

2.2.1.1. Personal.

Las revisión de la estructura debe hacerta personal capacitado para realizar supervisiones e inspecciones detalladas, y elaborar reportes de manera clara, precisa y sistemática. La confiabilidad de los reportes dependerá del conocimiento del inspector, por ello se recomienda que quien realice la inspección sea un ingeniero o especialista que tenga experiencia con la RAS.

2.2.1.2 Información de la Estructura.

Toda la información disponible relativa a la estructura debe evaluarse cuidadosamente antes de iniciar los trabajos de inspección del especialista. La información que generalmente se puede obtener por adelantado puede ser:

1. El nombre de la estructura o la referencia del dueño.
2. La localización de la estructura, incluyendo ubicación en mapas, planos y las referencias con otras estructuras cercanas.
3. El tipo de estructura y las condiciones ambientales a las cuales esta sujeta por su localización geográfica.
4. Edad, incluyendo fecha de inicio y término de la obra, y todos los datos de reparaciones y mantenimiento posterior al término de su construcción.
5. Cargas de diseño y detalles constructivos de la estructura y subestructura.
6. Información del concreto usado, proporción de la mezcla, origen de los materiales (agregado y cemento), y cualquier ensaye que se haya realizado al concreto posteriormente.
7. Reportes de inspecciones anteriores y de pruebas realizadas, datos de la fecha en que se detectaron por primera vez los daños de forma visual.

8. Información de otras estructuras colindantes que se encuentren en condiciones similares y las causas de su estado.

9. Planos Estructurales y Arquitectónicos.

2.2.1.3. Visita a la Estructura.

2.2.1.3.1. Programa para las inspecciones.

El programa debe incluir:

1. Equipo completo y adecuado.
2. Accesibilidad al lugar.
3. Observaciones del lugar.

-Debe anotarse el clima que se presenta al realizar las observaciones porque puede influir en estas. e.g. temperatura, humedad.

-Condiciones climatológicas. Se debe hacer una evaluación de las condiciones a las cuales la estructura ha estado expuesta, incluyendo cualquier cambio de uso que haya ocurrido durante su servicio. El grado y frecuencia de los cambios de humedad son importantes.

2.2.1.3.2. Aspectos en la superficie del concreto que pueden indicar la existencia RAS.

a. Agrietamiento.- La localización y disposición del agrietamiento debe analizarse con cuidado. Tomar fotografías es una manera confiable de obtener esta información, sin embargo las grietas más grandes deben dibujarse a escala real. Debe de tenerse cuidado para no confundir el agrietamiento estructuralmente importante de aquel que ocurre superficialmente en el recubrimiento.

b. Descoloramiento. La presencia de manchas blanquecinas en el concreto son un indicio de RAS y con frecuencia se presenta en los bordes de las grietas, pero pueden aparecer como manchas en las superficie con algunos parches oscuros, aún si no existe agrietamiento.

c. Eflorescencia y Exudaciones. Se debe observar la posición, extensión y magnitud de la eflorescencia; deben registrarse el color, textura, humedad y dureza de las exudaciones depositadas en la superficie del concreto. Se deben tomar muestras para identificación posterior.

d. Erupciones. La expansión de partículas de agregado cercanas a la superficie o cara del concreto puede en ocasiones provocar el desprendimiento de una porción de concreto -de forma cónica por lo regular- dejando una cavidad. Se debe observar la característica del agregado en la base del fragmento; desprendido; naturaleza, constitución, etc.

e. *Movimientos, Desplazamientos y Deformaciones.* La RAS puede provocar expansiones, así que se tiene que registrar cualquier movimiento anormal de la estructura, disminución del espacio entre juntas, desplazamientos relativos o diferenciales, deflexiones excesivas, o alabeo de algunos elementos son ejemplo de deformaciones posibles por expansión.

2.2.1.4. Evaluación e Interpretación de la Inspección de la Estructura.

A pesar de haber ciertos síntomas característicos de la RAS en las inspecciones realizadas no se puede afirmar que existe RAS; es decir, no es posible diagnosticar RAS hasta que se hayan llevado a cabo los ensayos o pruebas de laboratorio, y estos verifiquen que existe evidencia suficiente, no solo indicios, de la RAS en el concreto. Por lo que el objetivo inmediato o primero de la inspección de la estructura es decidir si existe o no algún aspecto que indique que la estructura puede estar afectada por la RAS; y de igual importancia es determinar si la estructura presenta características que sugieran la presencia de otro tipo de fenómeno o causa del deterioro del concreto, y se programen las pruebas más apropiadas para la investigación. La evidencia de la RAS en el concreto se incrementa así como aumenten los síntomas característicos que lo confirmen. Se elabora un reporte de los distintos aspectos de la RAS observados y se valora su contribución real al daño presente en la estructura. Debe tenerse presente que estos datos se basan en observaciones visuales en su mayoría, por lo que cualquier aspecto que sugiera la existencia de la RAS no es un dato concluyente por sí solo para asegurar un diagnóstico positivo de RAS.

2.2.1.4.1. *Medio Ambiente.* La presencia de humedad o disponibilidad de agua es una condición indispensable para la formación del gel álcali-silice y la consecuente expansión. Si existen sales en contacto con el concreto, el riesgo de daño por la RAS aumenta, porque estas sales pueden incrementar el contenido de álcalis en el concreto, a pesar del uso de cementos bajos en álcalis. El medio ambiente debe considerarse como un factor determinante para que ocurra la reacción.

2.2.1.4.2. *Agrietamiento.* En elementos planos de concreto-losas y pisos-, los agrietamientos provocados por la RAS formarán frecuentemente estrellas de 3 ramas. El patrón de agrietamiento puede alterarse por el refuerzo del concreto o condiciones de carga. En concreto reforzado las fisuras reflejan la distribución del acero interior. Los agrietamientos se formarán paralelos a la dirección de los esfuerzos de mayor intensidad, nunca perpendiculares a ellos. Un juicio adecuado de la importancia de los agrietamientos no puede, por lo tanto, hacerse sin el conocimiento del refuerzo o presfuerzo, la cantidad de restricciones y las cargas.

2.2.1.4.3. *Descoloración de la Superficie.* Es muy común que las grietas provocadas por la RAS estén bordeadas por zonas descoloridas en el concreto. Sin embargo, puede existir un borde con zonas más oscuras dando la apariencia de concreto humedecido. La RAS no es la única causa de manchas en el concreto, pero la presencia de estas pueden sugerir que la RAS está presente.

2.2.1.4.4. Eflorescencia y Exudaciones. El gel puede presentarse con exudaciones en la superficie de concreto, pero no siempre sucede. Si existe la presencia de exudaciones junto con agrietamientos es una evidencia importante de que el elemento presenta la RAS.

2.2.1.4.5. Erupciones. Este aspecto no siempre se presenta, solo en algunos países ocurre este fenómeno. El desprendimiento puede ser provocado por muchos otros aspectos, e.g. congelamiento, así que no debe ser tomado en cuenta como un síntoma determinante para el diagnóstico positivo de la RAS en las estructuras.

2.2.1.4.6. Conclusiones de la Información Obtenida. Por cada uno de los síntomas presentes analizados se determinará:

- El grado en que se presenta la RAS, en función de la presencia del síntoma encontrado.
- La extensión en relación con el elemento estructural, y con respecto a la estructura total.
- La magnitud del daño o deterioro producto de la característica o rasgo observado.

**Tabla 1. Rasgos Visuales.
-Índices de Extensión y Severidad-**

Clasificación	Índice
Extensión del Rasgo	
Sin Importancia	1
Ligera, hasta el 5% del área o longitud	2
Moderado del 5% al 20% del área o longitud	3
Extenso, más del 20%, pero no todo	4
Total, toda el área afectada.	5
Severidad del Rasgo	
Insignificante	1
Menor, de naturaleza exterior o superficial	2
Inaceptable, requiere atención	3
Daños severos o requiere de atención inmediata	4
Estructuralmente inseguro	5

El daño observado y las condiciones ambientales deben cada una ser clasificados (cualitativa y cuantitativamente) en términos de su extensión y severidad, como se sugiere en la tabla 1.

Cada clasificación tiene un índice que ayuda para determinar el diagnóstico de la causa del deterioro, de las condiciones de la estructura y las recomendaciones para el uso futuro o vida remanente.

Cuando se evalúe la información para determinar la causa del deterioro y la influencia que la RAS haya tenido, solo: a) el grado en que la RAS se haya indicado, b) la extensión y c) la severidad serán factores críticos que influyan en las recomendaciones para la reparaciones y uso de la estructura.

La extensión del daño y severidad deben considerarse cuando se decida si los ensayos de laboratorio, pruebas de campo u otras investigaciones se requieren para determinar la causa real y proceder a su reparación o esperar hasta que exista más evidencia de las pruebas.

Hasta aquí se puede concluir que, si las condiciones ambientales no son propicias para provocar la RAS, entonces no es recomendable realizar mayores pruebas y enfocarse a analizar otras posibles causas del deterioro. En el caso de que las condiciones ambientales sean propicias para provocar la RAS, entonces, de todos los rasgos descritos anteriormente debe decidirse la posibilidad de que RAS haya producido la característica observada como baja, moderada, o alta.

Si una característica se clasifica como alta, entonces, ensayos de la RAS se justifican.

Si una o más se clasifican como moderado, ensayos de la RAS en laboratorio se requieren si se desean eliminar todas las posibilidades.

Si todas las características se clasifican como baja, entonces no se requieren ensayos de laboratorio, y todos los esfuerzos se deben concentrar en otras posibles causas del deterioro.

2.2.1.5. Pruebas de campo e instrumentación.

2.2.1.5.1. Pruebas no destructivas. Es raro que las pruebas no destructivas proporcionen alguna información adicional como causa de RAS, pero puede utilizarse para asesorar en las observaciones visuales y en deformaciones no detectadas a simple vista.

2.2.1.5.2. Instrumentación. En muchos casos, la magnitud del daño al momento de la inspección es insuficiente para justificar otros ensayos o iniciar el proceso de reparación, pero puede ser necesario instrumentar la estructura, o parte de ella, para dar seguimiento a cualquier cambio o aumento en el daño de la estructura.

Para registrar el desarrollo de grietas se suele utilizar gráficas a escala o de manera más práctica a través de fotos. Con la distribución de las grietas y su ancho, el efecto de las condiciones ambientales, como cambios de humedad y temperatura, se puede evaluar de forma más precisa.

Las deformaciones y movimientos de algunos elementos estructurales pueden instrumentarse con strain gages, ya sea mecánicos o eléctricos.

El seguimiento del comportamiento del concreto con ultrasonido (UPV) puede ayudar. La velocidad del sonido a través de un medio depende de la densidad y magnitud del módulo elástico dinámico del medio. Se ve afectado por cambios de fases del estado físico del medio, sólido, líquido o gaseoso. Por lo que el UPV nos da información acerca de cambios de la estructura interna del concreto, incluyendo el desarrollo de microgrietas producto de la RAS.

2.2.2. Muestreo.

El programa de muestreo esta ligado directamente al programa de ensayos. Los ensayos deben incluir investigación de otros factores tales como carbonatación y ataque de cloruros.

El número de muestras que se requieren depende del tipo de estructura, tamaño y complejidad de la misma. El esquema de muestreo debe proporcionar una serie de muestras representativas de los elementos de la estructura bajo investigación. Debido a la inhomogeneidad del concreto en estructuras grandes, tres áreas deben escogerse por cada elemento, cimentación, vigas, columnas, losas, etc.

Inevitablemente las condiciones de acceso y económicas serán factores decisivos en la selección del lugar de muestreo y del número de muestras que se tomarán.

El método más usado de muestreo es la extracción de corazones además que es la única técnica capaz de producir muestras apropiadas a las necesidades de la mayoría de los análisis de laboratorio y ensayos.

Se recomienda usar diámetros de 100 mm. En casos donde se deba evitar el corte de barras de refuerzo se pueden realizar corazones de 50 mm, pero no se recomienda. Los corazones deben ser tan largos como sea posible e incluso atravesar al elemento, con esto se puede conocer si existen grietas o fisuras interiores en el elemento.

Se debe tener el cuidado normal de los corazones, es decir, hacer una descripción visual en el lugar, etiquetarlo, señalar la presencia de refuerzo, y llevar un registro fotográfico. Se debe tener cuidado de sellar bien las muestras para prevenir que se sequen y se produzca una carbonatación.

2.2.3. Investigación de Laboratorio.

El objetivo de la investigación de laboratorio incluye tres aspectos fundamentales:

- a) Exámenes a las muestras para detectar presencia de RAS, y en que proporción contribuye al daño que presenta la estructura.
- b) Determinar la posibilidad de que exista posteriormente la reacción y/o expansión.
- c) Contribuir a la revisión estructural de la estructura.

2.2.3.1. Métodos Disponibles.

En la tabla 2 se muestran los métodos disponibles y su objetivo. Normalmente se realizan más de una prueba para obtener suficiente evidencia para el diagnóstico.

Los corazones una vez en el laboratorio deben reconstruirse en caso de que se hayan fracturado, identificarlos debidamente con etiquetas, y hacer una breve descripción de su aspecto. Es conveniente tomar fotografías. Cuando se realice el examen preliminar las muestras deben humedecerse en agua corriente, después se dejan secar y se pueden observar claramente las fisuras y manchas.

2.2.3.2. Selección de los especímenes de prueba.

Cualquier depósito en la superficie de la muestra se debe retirar para hacer las observaciones y seleccionar las partes de la muestra para los ensayos posteriores (láminas para petrografía, microscopía, etc.).

2.2.3.3. Observaciones en Microscopio Electrónico.

Las observaciones en microscopio son útiles para hacer una descripción cualitativa del agregado, verificar el patrón del agrietamiento, observar los anillos de reacción alrededor del agregado, detectar productos de la reacción (gel), determinación cuantitativa de la composición del agregado y una estimación de la proporción de la mezcla de concreto.

Tabla 2. Pruebas de Laboratorio para el Diagnóstico de la RAS en las Estructuras.

Prueba	Propósito	Uso e importancia de los Resultados en la:	
		Prognosis	Evaluación Estructural
Ensayos preliminares en el laboratorio	Completar la información de las muestras obtenidas, buscar signos de la RAS y seleccionar áreas para la exploración detallada	***	***
Examen en Microscopio	Encontrar signos de la RAS	**	
Medición de cambios de longitud y disposición del agrietamiento	Auxiliar para definir la magnitud y severidad del daño	.	.
Proporción volumétrica de la mezcla	Para determinar la proporción del concreto. Cuantificar la cantidad de material reactivo o potencialmente reactivo		**
Petrografía	Identificar el material potencialmente reactivo o productos de la reacción. Confirmar la existencia de gel, zonas de reacción, y presencia de microgrietamiento.	***	.
Determinación del contenido de álcali en el concreto	Confirmar que el contenido de álcali es suficientemente alto para causar la RAS	**	**
Determinación del contenido de cemento	Conocer la proporción cemento/álcali	.	**
Determinación del contenido de cloruros	Conocer la contribución de los cloruros al contenido de álcali en el concreto		.
Examen de las exudaciones y de los productos cristalizados	Identificar exudaciones, productos cristalizados o gel álcali-silice	**	.
Pruebas de expansión	Auxiliar en la evaluación estructural	**	***
Pruebas de compresión y tensión	Auxiliar en la evaluación estructural	.	**

2.2.3.4. Petrografía.

Los exámenes petrográficos realizados por personal con experiencia son un elemento importante en el diagnóstico de la RAS, además de obtenerse información sobre la composición física y condición del concreto. Además se puede determinar la cantidad de vacíos, el uso de aditivos minerales y mezclas en el cemento, puzolanas o escoria granulada de alto horno, etc. En la petrografía se identificará al agregado reactivo, la posible presencia de gel y de microgrietamiento. Sin embargo, la petrografía no da información del grado o extensión del daño.

La expansión producto de la RAS puede causar agrietamiento tanto en el agregado como en la pasta de cemento, en algunas ocasiones puede aparecer el gel álcali-silice. Las partículas reactivas se agrietan y se propaga a la pasta que las rodea. En ocasiones el gel se puede infiltrar y encontrar lejos de la partícula reactiva, eventualmente llenando grietas. El petrógrafo debe estudiar las fisuras y determinar su relación con el agregado.

2.2.3.5. Análisis Químicos de las muestras.

Determinación del contenido de álcalis del concreto. La determinación del contenido de óxido de sodio y potasio del concreto puede utilizarse para decidir si el contenido original de álcalis es suficientemente alto como para provocar el daño por RAS, sin embargo, los resultados no son fáciles de interpretar. En ocasiones un elemento puede estar expuesto en algunas de sus caras a un ambiente húmedo y por otra a uno seco, se crean concentraciones de álcalis en alguna de sus caras -tendientes a concentrarse en las zonas más secas-. Lo anterior puede alterar los resultados y no ser representativo de las condiciones reales del concreto.

Determinación del contenido de cemento. No es necesario determinar el contenido de cemento del concreto, porque la magnitud de los daños se referirán al contenido de álcalis y no al contenido de cemento.

Exámen de las exudaciones y productos cristalizados. El gel de la RAS no es siempre cristalino, por lo que debe estudiarse con un microscopio con luz polarizada para determinar su anisotropía y estimar su índice de refracción. El índice de refracción del gel álcali-sílice es 1.4 por lo general. Los productos cristalizados pueden estudiarse por medio de Difracción de Rayos-X (X-Ray Difracción).

Pruebas de Expansión. La determinación de las características expansivas del concreto afectado por la RAS puede dar información útil si la reacción ha terminado o si puede continuar.

En estas pruebas se registra el cambio en longitud de los especímenes almacenados en recipientes a una cierta temperatura y humedad controladas durante un tiempo determinado, puede durar meses o inclusive años. Los registros se realizan a intervalos, y se utilizan para calcular la expansión en cada periodo.

2.2.3.6. Evaluación de los Resultados de las Pruebas de Laboratorio.

Algunos aspectos de la RAS pueden tomarse como síntomas inequívocos en el diagnóstico de la RAS, otros solo sirven para sugerir la RAS, porque pudieron haber sido provocados por otro mecanismo. La presencia del gel álcali-sílice en las grietas observado al microscopio puede ser una evidencia contundente de que la RAS existe en el concreto. No hay una relación entre la cantidad del gel y la magnitud de las expansiones o cantidad de grietas.

Además de la presencia del gel álcali-sílice, otra prueba fidedigna, veraz, es la observación de los lugares de expansión en láminas del concreto. Se mostraran por la presencia de gel y el inicio de grietas en la partícula y afectando la pasta de cemento.

Otros aspectos que contribuyen para respaldar el diagnóstico de RAS, pero no para sustentarlo por si solos, son los siguientes:

- a) Agrietamiento y microagrietamiento.
- b) Fracturas internas de las partículas de agregado.
- c) Manchas oscuras en la pasta de cemento que rodea al agregado.
- d) El reconocimiento de agregados reactivos o potencialmente reactivos conocidos.
- e) La formación de manchas de aspecto húmedo en la superficie del concreto.
- f) Contenido de Alcalis.

Se insiste que ninguno de los aspectos antes mencionados constituye evidencia suficiente para hacer un diagnóstico positivo de RAS, pero la presencia de ellos o varios en las muestras pueden apoyar la validez del diagnóstico.

2.2.3.7. Evaluación de los Resultados de Laboratorio.

La evaluación cuidadosa de los resultados de los ensayos de laboratorio deben permitir identificar con certeza la RAS, o descartarla.

Si las pruebas de laboratorio incluyen una o más de los aspectos de certeza (e.g. gel), entonces la RAS se debe considerar positivamente diagnosticada, si estos se han observado en varias zonas en la estructura donde exista expansión entonces se puede considerar a la RAS como parte de los daños causados en la estructura.

Si solo algunos aspectos indicativos se han observado, y no existe otra explicación más adecuada, entonces se requerirán más pruebas o ensayos de laboratorio antes de determinar de manera definitiva a la RAS como causa de los daños.

2.2.4. Análisis de los Resultados de Laboratorio y de las Observaciones del Sitio.

La inspección sistemática de la estructura puede cuantificar la magnitud de los daños en la estructura, pero no puede confirmar la presencia de la RAS sin el soporte de los resultados de laboratorio. Los resultados de laboratorio pueden por si solos corroborar la existencia de RAS en el concreto. Es difícil y en ocasiones imposible correlacionar cualquier característica de RAS en las muestras de corazones de concreto y lo que se observa o verifica en el lugar. No existe en la actualidad una ruta o guía objetiva para relacionar las observaciones en el sitio y los resultados que se obtienen

en laboratorio. En este sentido Thaulow y Geiker⁶³ realizaron una propuesta para determinar la reactividad potencial remanente en el concreto, donde utilizan una combinación de varios métodos, sin embargo es necesario realizar más investigaciones para probar su efectividad en estructuras afectadas. Para combinar los datos de laboratorio y la inspección del sitio se sugiere que se haga una clasificación de las observaciones y se simplifique definiendo si hay una probabilidad "alta" o "baja" de que la característica observada sea debido a RAS. Lo anterior combinado con los resultados de laboratorio, se procede a realizar un diagnóstico. La tabla 3 ayuda en la decisión del diagnóstico.

Tabla 3. Correlación entre los resultados de laboratorio y las observaciones del sitio.

Observaciones en el sitio	Presencia de rasgos que confirmen la RAS	Presencia de rasgos indicativos de RAS	Posible diagnóstico de la RAS
Alta	Si	Si	Se confirma la RAS como la causa principal de los daños
Alta	Ninguno	Si	La RAS puede estar entre las causas del daño
Alta	Ninguno	Ninguno	No ha ocurrido RAS, el daño es causado por otros factores
Baja	Si	Si	La RAS existe, pero de carácter no expansivo o causa menor de los daños
Baja	Ninguno	Si	La RAS es causa menor de los daños
Baja	Ninguno	Ninguno	La RAS no se ha presentado

2.3. EVALUACION DE LOS AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS.

2.3.1. Introducción.

La información más confiable y veraz de una potencial reacción álcali-silice entre los agregados y la solución de poro del concreto se basa en el conocimiento del comportamiento que ha tenido el material en estructuras existentes. Sin embargo, si no existe la información o se juzga poco confiable por diversas razones, se deben realizar ensayos de laboratorio a los agregados para conocer su comportamiento.

La decisión del uso del agregado debe realizarse tomando en cuenta los resultados de las pruebas de laboratorio, conociendo las limitaciones de cada prueba, comparando el desempeño de materiales similares en campo, y las condiciones ambientales a las cuales estará expuesta la estructura.

2.3.2. Métodos de Laboratorio para Reactividad Potencial.

Existe actualmente una gran variedad de métodos para evaluar a los agregados que se consideren potencialmente reactivos con los álcalis, algunos son adaptaciones o revisiones de algún método desarrollado anteriormente; en la tabla 10 se muestran las pruebas que se utilizan en diferentes países. Se definen cuatro grupos principales:

1. Petrografía. (≧ 1 día).

2. Métodos Químicos.

- Método Químico ASTM C289 Método químico (2-3 días).
- Método Químico Modificado (ASTM C289 en residuos insolubles).
- Prueba Alemana de Disolución (1 día).
- Prueba de Celda Osmótica (< 40 días).
- Método de Contracción Química (1 día).

3. Pruebas de Expansión que usan Barras de Mortero.

- Método ASTM C-227 (6 meses).
- Método AFNOR P 18-585 (6 meses).
- Método CCA (Cement and Concrete Association, 8 meses).
- Método Danés Acelerado (5 meses).
- Método NBRI o ASTM C 9 P-214 Método Acelerado (14 días)
- Métodos en Autoclave (Chino, Japonés y Canadiense) (> 3 días).

4. Pruebas de Expansión que usan Prismas de Concreto.

- Método CÁN-CSA A23.2-14A (1 año).
- Método AFNOR P 18-587 (8 meses).

- Método de Sudáfrica (21-24 días).
- Método de la BSI 812 (1 año).
- Método CCA (Cement and Concrete Association, 6 meses)
- Métodos en Autoclave.

Estos métodos son todos en realidad métodos acelerados, el objeto de cada uno es predecir en un tiempo menor a un año -generalmente-, el comportamiento del agregado a 5, 15, 30 años o más, sujetos a las diferentes condiciones a las cuales estará expuesto. Para acelerar la reacción se llevan a cabo uno o más de los siguientes procesos:

1. Incremento de la cantidad de álcalis; usando mezclas de alto contenido de álcalis o sumergiendo los especímenes en soluciones alcalinas.
2. Almacenando los especímenes a temperaturas elevadas; e.g. 38 °C, 80 °C o más altas por medio de Autoclave.
3. Incremento de la presión; e.g. por medio de Autoclave.
4. Incremento de la humedad a la cual se expone el espécimen, e.g. 100% de humedad relativa, o por inmersión en un medio acuoso.
5. Reduciendo el tamaño del agregado para aumentar el área específica.

El primer paso para evaluar el comportamiento de un agregado que se ha decidido analizar consiste en realizar un estudio de petrografía. El estudio permite reconocer los componentes reactivos del agregado, si lo realiza un petrógrafo con experiencia en RAS, se puede decidir con base en materiales similares de conocido comportamiento en campo, si el agregado se acepta o se rechaza para producir el concreto. Si lo anterior no es posible, la petrografía servirá entonces para decidir por el mejor método de prueba de acuerdo al tipo de componente reactivo del agregado, de esta manera se evita especular y reducir gastos en pruebas irrelevantes.

2.3.2.1. Petrografía.

El examen petrográfico de láminas del agregado con microscopio óptico permite generalmente identificar los minerales o rocas potencialmente reactivas. Otras técnicas como Difracción de rayos X (XRD), Espectroscopia infraroja (IRS), o Microscopía electrónica de barrido (SEM), pueden auxiliar en la evaluación del agregado. El examen petrográfico no proporciona información de la expansión que pudiera ocurrir con la combinación del agregado-cemento, pero si el petrógrafo tiene experiencia con el fenómeno podría predecir el comportamiento del agregado basado en el conocimiento de otros materiales con características conocidas. Varios investigadores recomiendan que se lleve a cabo este examen antes de cualquier otro tipo de prueba. Si se realiza una buena

petrografía, aún sin que se pueda predecir el comportamiento del agregado, se identifica el tipo de material y de esta forma las pruebas posteriores están orientadas; esto permite ahorrar tiempo y esfuerzo en pruebas no adecuadas.

2.3.2.2. Métodos Químicos.

2.3.2.2.1. Método Químico (ASTM C289).

Esta prueba es la más utilizada actualmente de los métodos químicos como medio para evaluar la reactividad potencial del agregado. Se requiere solo una pequeña cantidad de material y los resultados se obtienen en pocos días. Para realizar la prueba se requieren 25 gr del material triturado a un tamaño entre 150 y 300 micras, se diluyen en 25 ml de una solución 1N de NaOH durante 24 horas a una temperatura de 353 °K (80 °C). La solución se filtra y se analiza para obtener la sílice disuelta (Sc) y la disminución en alcalinidad (Rc). Los resultados se dibujan sobre una gráfica estándar, la cual incluye tres zonas que definen a agregados inocuos, perjudiciales y potencialmente perjudiciales.

Este método se aplica para determinar la reacción potencial álcali-sílice. Los resultados de esta prueba en diferentes partes del mundo son ambiguos, mientras que en algunos países se han identificado a los agregados reactivos, en otros el método clasifica como reactivos algunos agregados que han demostrado no ser perjudiciales.

Una de las causas es que la gráfica original se basó en el estudio de 71 rocas existentes en los E.U. que contenían ópalo, calcedonia o vidrio, todos son materiales muy reactivos, y para los cuales los resultados no presentaban dificultad para identificarlos en la gráfica. El método falla con algunos agregados inocuos por la variación de algunos aspectos de proceso, la trituración, la temperatura, etc. Las investigaciones en varios países prueban que este método no es adecuado para todos los materiales. Algunos investigadores han modificado la carta original para adaptarla a las condiciones locales.

Se obtiene resultados incorrectos para los agregados que contienen carbonatos de calcio, carbonato de magnesio, o del ión ferroso, como la calcita, magnesita o la siderita; o silicato de magnesio como la antigorita (serpentina)⁶⁶. La interpretación de los resultados de esta prueba requiere del conocimiento de las características petrográficas y la composición química del agregado, y tener conocimiento de las limitaciones del método.

2.3.2.2.2. Método Químico Modificado (Modified Chemical Method).

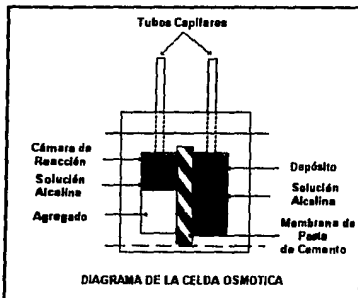
Este método es una variación del método químico ASTM C289 con objeto de evaluar a los agregados que puedan presentar una reacción potencial álcali-carbonato. Se realiza el procedimiento de la prueba química estándar en los residuos insolubles de los especímenes después de diluir el carbonato del agregado en una solución de HCl. El método se utiliza en Canadá con éxito para identificar algunas calizas, dolomitas reactivas, así como rocas con silicatos y carbonatos.

Rocas reactivas que contienen silicatos como las tobas reolíticas, esquistos cloríticos donde falla el método estándar, son identificadas con el método modificado. Existen ciertos tipos de rocas que contienen silicatos reactivos que no es posible identificarlos con este método; mientras otros conocidos como inocuos se les clasifica como reactivos. Por lo que este método no debe usarse como criterio de aceptación o rechazo de un agregado. En general este método no ofrece una mayor eficiencia que el método acelerado NBRI de barras de mortero.

2.3.2.2.3. Prueba de Disolución Alemana (German Dissolution Test).

El Método se desarrolló para determinar la reactividad potencial de ciertos agregados que contienen ópalo y pedernal. Una cantidad y granulometría específicas de material se sumerge en una solución de NaOH a 90 °C durante una hora. El agregado se lava, seca y se obtiene su peso. La pérdida de masa, que se llama masa "soluble en álcalis", se toma como una medida de la reactividad potencial del agregado.

Al igual que los métodos químicos anteriores la Prueba de Disolución Alemana es una forma de cuantificar la inestabilidad química del agregado en consideración en un medio altamente alcalino. Por lo anterior no es posible probar diferentes combinaciones cemento-agregado, además no proporciona un dato sobre la magnitud de la expansión que se puede presentar en el concreto elaborado con el agregado que se somete a la prueba. Esta prueba requiere más investigación con diferentes agregados.



2.3.2.2.4. Prueba de Celda Osmótica (Osmotic Cell Test).

El aparato que se utiliza en la prueba, cuyo objetivo es simular la zona entre las partículas del agregado y la pasta de cemento, fué desarrollado por Verbeck y Gramlich para estudiar el mecanismo de la reacción álcali-silice.

La celda osmótica tiene dos cámaras cada una llena con una solución 1N NaOH. Las cámaras están separadas por una membrana de pasta de cemento con una relación agua-cemento igual 0.55. Una muestra del agregado de 12.40 gr con una granulometría entre 150-300 micras se coloca en la "cámara de reacción". Si se produce la RAS la solución fluye del "depósito" a la cámara de reacción, si esto ocurre, existe un flujo positivo a través de la membrana de pasta cemento. La reactividad del agregado se determina por la diferencia en la altura registrada en los tubos capilares colocados sobre las cámaras de reacción. El flujo se mide en términos del diferencial de altura entre el tiempo, e.g. 1.5 a 2 mm por día representa un agregado potencialmente reactivo; si el flujo es negativo (inverso), representa a un agregado inocuo. Este método (Stark) es una prueba rápida que requiere más investigación, ya que ofrece buenas perspectivas de uso.

2.3.2.2.5. Prueba de la Pastilla de Gel (Gel Pat Cell).

En este método el agregado que se estudia se coloca en una pastilla hecha solo de cemento, después de guardarse en el cuarto de curado una de las caras se cubre. La pastilla se pule y se sumerge en una solución alcalina saturada con un compuesto calizo, se guarda en un recipiente y se almacena a temperatura ambiente. De esta manera se produce el gel álcali-silíce en la superficie de la pastilla en 5 días aproximadamente para materiales reactivos como el ópal. Si se incrementa la temperatura se puede reducir el tiempo para producir el gel.

Si se presenta el gel de la RAS (Jones y Tarleton) no implica necesariamente que el agregado tenga un comportamiento perjudicial en el concreto. Este método es cualitativo (Sims), la prueba de la pastilla de gel no es un medio para rechazar un agregado, simplemente es una prueba que puede complementar el diagnóstico de un agregado.

2.3.2.2.6. Prueba de Contracción Química.

Knudsen desarrolló un método químico basado en el principio en que una arena reactiva sumergida en una solución altamente alcalina experimenta una contracción o disminución de volumen -"contracción química"- por la disolución de la sílice. El método se utiliza en Dinamarca para evaluar la RAS en los agregados para el concreto.

En esta prueba se elaboran especímenes con 25 gr de arena saturada con agua entre las fracciones de 0.3-1, 1-2, 2-4 mm, se colocan en un matraz con 50 ml de una solución 10N NaOH, procurando eliminar completamente el aire contenido en la arena. Se coloca una pipeta de 0.2 mm en la tapa del matraz, y este se somete a un baño al vapor a 50 °C. Después de 20 min aproximadamente, una vez alcanzado el equilibrio térmico del sistema, el nivel indicado en la pipeta comienza a disminuir como resultado de la contracción química que experimenta el material. El cambio de niveles se registra durante 20 hr. La prueba y el registro de los resultados se realiza automáticamente con un aparato llamado Konómetro. El método se probó (Chatterji) con 20

agregados de Dinamarca y se compararon los resultados con barras de mortero sumergidas en una solución de NaCl 50 °C. Se utilizó un límite de 0.40 ml de pérdida de volumen por kg. después de 20 horas como límite de aceptación. En general el método mostró buenos resultados, cuando menos con los materiales probados.

2.3.2.3. Pruebas de Expansión que usan Barras de Mortero.

2.3.2.3.1. Método ASTM C-227 (6 meses)¹⁰².

Las barras se elaboran con el agregado que se requiere estudiar, se utiliza un cemento con un contenido de álcalis mayor a 0.6 % como Na₂O equivalente. Las barras se almacenan a 38 °C y una humedad relativa de 100% en recipientes cerrados. Se registran los cambios de longitud por periodos. Los límites de expansión sobre los cuales se consideran perjudiciales son: 0.10% a los 6 meses, o 0.05% a los 3 meses, este último límite se utiliza si no existen registros para 6 meses.

Pueden presentarse expansiones pequeñas cuando estén presentes rocas silicosas en proporciones comparativamente altas, aún cuando se usen cementos con un alto contenido de álcalis; lo anterior se debe posiblemente a que los productos de la reacción álcali-silice se caracterizan por una relación entre álcali y silice muy baja como para reducir al mínimo la absorción de agua y la expansión. Los agregados dolomíticos potencialmente reactivos con los álcalis, pueden producir expansiones extremadamente bajas o no producirlas. En algunos casos las expansiones pueden ser significativas por razones distintas a la RAS, especialmente por la presencia de sulfatos en el agregado que atacan a la pasta de cemento, o de sulfatos ferrosos (pirita, marcasita o pirrotita) que se oxidan e hidratan con el desprendimiento del sulfato, y materiales tales como la cal libre (CaO) o la magnesia libre (MgO) presentes en el cemento o agregado, que progresivamente se hidratan y carbonatan. En caso de que la expansión exceda de los límites indicados, no se debe rechazar al agregado hasta obtener información complementaria y confirmar que la expansión se debe realmente a la reactividad potencial.

El método presenta variaciones importantes si se modifican las condiciones de curado, los recipientes de las barras, el contenido de álcalis, la relación agua-cemento, y la relación cemento-agregado. Por lo que deben cuidarse estos aspectos para no obtener resultados erróneos.

2.3.2.3.2. Método AFNOR P 18-585 (6 meses).

La Asociación Francesa de Normalización propone un método de barras de mortero cuyas principales características son las siguientes:

-El contenido de álcalis del mortero se incrementa a 1.25% expresado como Na₂O equivalente.

-Las barras son ligeramente más chicas que las barras del método ASTM.

-Las barras se almacenan en un recipiente metálico. Los recipientes se almacenan en agua dentro de un "reactor" en donde la temperatura se mantiene a 38 °C, manteniendo el agua caliente. De esta forma las variaciones de temperatura se reducen, así como la condensación y lixiviación de álcalis de las barras. Las modificaciones que implementa este método corrige algunos de los problemas que presenta el método de barras de la ASTM.

2.3.2.3.3. Método CCA (*Cement and Concrete Association, 8 meses*).

El método que propone la Asociación del Cemento y del Concreto, se preparan 3 barras de 25x25x250 mm, usando una relación agregado/cemento y agua/cemento de 3 y 0.4 respectivamente, el contenido de álcalis debe ser de 1% aproximadamente expresado como Na₂O equivalente. Las barras se envuelven con una tela húmeda y se colocan en bolsas de plástico. La tela se humedece periódicamente. El límite de la expansión propuesto es de 0.05% a 6 meses. Si un agregado pasa el límite no se clasifica como potencialmente reactivo hasta que el exámen petrográfico confirme que la expansión es por RAS. Las modificaciones propuestas en este método pretende corregir los problemas de la prueba de barras de la ASTM.

2.3.2.3.4. Método Danés Acelerado (*5 meses*).

Se usan barras de 40 x 40 x 160 mm, una relación cemento:agregado 1:2 y una relación agua/cemento de 0.5. Las barras se sumergen en agua durante 28 días, después se pasan a una solución de NaCl a 50 °C, y se registran las lecturas semanalmente. Los límites que se proponen para agregados inocuos y perjudiciales es 0.10% después de 20 semanas (5 meses). Se han probado distintas arenas de Islandia, Suecia y Dinamarca, obteniendo buenos resultados, además de una buena correlación con el método de barras ASTM C227¹⁰³ tomando como límite 0.1% a un año. El método requiere de un tiempo mínimo de 6 meses por lo que no lo hace atractivo en comparación con otros métodos.

2.3.2.3.5. Método Acelerado de Barras de Mortero (*NBRI, ASTM C 9 - Proposal P-214*)¹⁰⁴.

Las barras se elaboran conforme al método ASTM C227, se almacenan en el cuarto de curado a 23 °C. 24 horas después se procede a desmoldear y se colocan en un recipiente con agua a 80 °C durante 24 horas, se sacan y se toma la lectura "cero", las barras se colocan en un recipiente con una solución 1N de NaOH a 80 °C durante 2 semanas (14 días), se deben tomar 3 lecturas por lo menos. En el método NBRI original se dejaban en NaOH por 12 días.

La relación agua/cemento que propone la norma ASTM C9 -Proposal P-214 es 0.4 para agregados gruesos y 0.44 para el agregado fino. Es importante señalar que el tipo y contenido de álcalis del cemento no influye en la prueba (Bérubé).

La mayoría de los investigadores concuerdan en una expansión menor a 0.10% después de 14 días para considerar a un agregado inocuo, entre 0.1% y 0.20% para agregados potencialmente reactivos y, mayor a 0.20% para agregados considerados perjudiciales (ASTM C9 -Proposal P214). Existen numerosas propuestas para corregir los límites de esta prueba, e incluso se han considerado límites dependiendo del tipo de agregado. Solo un número muy reducido de agregados de reactividad comprobada no se han detectado con este método.

El método es severo con algunos agregados inocuos, por lo tanto, se debe tener cuidado para rechazar un agregado que se clasifica perjudicial con este método, se recomiendan pruebas adicionales para comprobar el comportamiento reactivo del agregado. Sin embargo este método es una herramienta rápida (14 días) para identificar a los agregados perjudiciales.

2.3.2.3.6. Métodos en Autoclave (Chino, Japonés y Canadiense) (> 3 días).

Existen diferentes propuestas de investigadores de métodos para evaluar la reactividad potencial donde los especímenes, ya sea barras de mortero o de concreto, se someten a un curado a vapor, y/o agua hirviendo, o a soluciones alcalinas a presiones y temperaturas elevadas. Las dimensiones de los especímenes, la relación agua/cemento, y las condiciones de curado varían entre las diferentes propuestas, pero en general consisten en modificaciones a los métodos propuestos por Tang et al., Tamura et al., y Nishibayashi et al. La reactividad potencial del agregado se determina realizando las mediciones del cambio de longitud de los especímenes, o por un examen visual (presencia de grietas). Este método se puede utilizar para evaluar diferentes combinaciones de cemento-agregado e incluso para la reactividad potencial de muestras de corazones de concreto.

El método en autoclave propuesto por Tang et al. se lleva a cabo en 2 días. Las barras tienen una dimensión de 10 x 10 x 40 mm, preparadas con una relación cemento:agregado:agua de 10:1:3, elevando el contenido de álcalis del cemento a 1.5% como Na_2O equivalente, adicionando NaOH disuelto en el agua de mezclado. Las barras se curan por 24 hr a 20 °C y 100% H.R., se someten a vapor por 4 horas, después se colocan en una solución de 10% de KOH por 6 horas a 150 °C en autoclave. Si la expansión excede de 0.10% - 0.15% el agregado se considera potencialmente reactivo. El método falla para detectar ciertos agregados reactivos como las riolitas, tobas y andesitas. El autor advierte que algunos agregados inocuos pueden ser clasificados de manera errónea. Además, solo se ha aplicado a un número reducido de materiales, por lo que se deben realizar más pruebas para comprobar el alcance del método y verificar los límites propuestos, usando otros tipos de agregados.

Los métodos en autoclave propuestos por Nishibayashi, Tamura y Fournier, se encuentran en la misma situación que el método de Tang et al., sólo se han aplicado a un determinado número de agregados y los resultados han sido positivos en algunos casos, por lo que requieren mayor investigación en otros tipos de agregados.

2.3.2.4. Pruebas de Expansión que usan Prismas de Concreto.

2.3.2.4.1. Método de Prismas de Concreto CAN-CSA A23.2-14A (1 año).

Se fabrican prismas con el agregado que se requiera probar de dimensiones entre 75 x 75 x 300 mm y 120 x 120 x 450 mm utilizando una arena inocua y un cemento con un contenido de álcalis aumentado a 1.25% expresado como Na_2O equivalente, por medio de la adición de NaOH al agua de mezclado (el contenido de cemento es de 310 kg/m^3). Se proponen dos condiciones de curado: la primera consiste en guardar los especímenes en el cuarto húmedo a 23 °C; la segunda en recipientes con agua sellados a 38 °C. La primera se utiliza para evaluar la reactividad potencial de cualquier tipo de roca, mientras que la segunda solo para la reactividad potencial álcali-carbonato. Se lleva un registro del cambio de longitud durante un año. La expansión no debe exceder de 0.04% a 38 °C (o de 0.025% a 23 °C).

Bérubé enfatiza la necesidad de realizar más investigación sobre este método con el objeto de tener mayor control de los parámetros como: sustituir la mesa de fluidez por una relación agua-cemento fija; las condiciones de curado, para reducir la pérdida de álcalis del concreto por lixiviación; y la proporción del agregado grueso y fino. Además esta prueba no detecta algunos agregados que se conocen perjudiciales del tipo de reacción lenta (álcali-silicato), para estos agregados es necesario aumentar el contenido de cemento. Actualmente se llevan a cabo estudios para revisar y ajustar el método en Canadá.

Este método de laboratorio actualmente ofrece los resultados más reales respecto al comportamiento de los agregados en campo. Identifica a la mayoría de los agregados perjudiciales de los que se conoce su comportamiento en estructuras. La duración de la prueba (1 año) es un inconveniente en situaciones donde se requieren resultados a corto plazo.

2.3.2.4.2. Método de Prismas de Concreto AFNOR P 18-587 (8 meses).

Esta prueba es similar a la prueba de prismas de concreto CSA, excepto por los siguientes puntos:

-En contenido de cemento se incrementa de 310 kg/m^3 a 410 kg/m^3 , aumentando el contenido de álcalis a 1.25% Na_2O equivalente respecto de la masa de cemento, con esto el total de álcalis es de 5.13 kg/m^3 .

-La relación de agregado grueso y fino es de 58/42.

-La dimensión de los prismas de concreto se reduce.

-Se almacenan en agua en recipientes metálicos sellados, los cuales se guardan en agua en un "reactor" donde la temperatura se mantiene a 38 °C, manteniendo caliente el agua del reactor. El reactor tiene una capacidad para 9 recipientes.

El método debe probarse para diversos agregados, sin embargo es la norma en el mundo que ofrece los resultados más reales del comportamiento de los agregados (Bérubé).

2.3.2.4.3. Método de Prismas de Concreto de Sudáfrica (21-24 días).

Este método utiliza prismas de concreto de 75 x 75 x 300 mm con una proporción grava:arena:cemento:agua de 3.38:1.87:1:0.5, un cemento de alto contenido de álcalis aproximadamente 1.30% Na₂O equivalente. Los especímenes se almacenan en agua en recipientes sellados a 38 °C. El método debe sujetarse a más investigación utilizando distintos agregados para probar su efectividad. Con las pruebas realizadas con agregados reactivos los resultados concuerdan con los obtenidos en la prueba de barras de mortero ASTM C227.

2.3.2.4.4. Método de Prismas de Concreto de la BSI 812 (1 año).

En esta prueba 4 especímenes con dimensiones de 75 x 75 x 200 son moldeados usando una proporción grava:arena:cemento:agua de 1.73:0.74:1:1.02, con un contenido de cemento de 700 kg/m³. El contenido de álcalis se eleva a 1.0% Na₂O equivalente adicionando sulfato de sodio al agua de mezclado, con lo que se tiene un total de 7 kg/m³. El método se recomienda para evaluar la reactividad potencial de arenas mezclándolas con gravas inocuas. Los especímenes se envuelven en papel húmedo y se colocan en bolsas de plásticos con agua y se almacenan en recipientes sellados a una temperatura de 38 °C.

Comparado con el método canadiense de prismas de concreto CSA, la dimensión de los especímenes, la proporción de la mezcla y las condiciones de almacenamiento se controlan mejor en este método. Por lo que respecta al contenido de álcalis (7 kg/m³) en base a estudios realizados con algunos agregados, Grattan-Bellew menciona que un contenido de álcalis tan alto puede clasificar algunos agregados inocuos como perjudiciales. Se requiere más investigación del método, en especial en lo referente al contenido de álcalis que exige la prueba.

2.3.2.4.5. Método de Prismas de Concreto CCA. (Cement and Concrete Association, 6 meses).

El método propuesto por la Asociación del Cemento y del Concreto de Inglaterra, tres prismas de concreto con dimensiones de 50 x 50 x 250 mm se fabrican con una proporción de agregado:cemento:a/c de 3:1: 0.40, con un contenido de álcalis de 1.0% Na₂O equivalente. Los prismas se envuelven en toallas húmedas y se guardan en bolsas de plástico a 20 °C. El límite de la expansión es de 0.05% a 6 meses. Si un agregado se expande más del límite no se considera potencialmente reactivo hasta que los resultados de la petrografía confirmen que la expansión se debe a la RAS.

La dimensión de los especímenes, la proporción de la mezcla y las condiciones de curado permiten un mejor control de la prueba que en el método canadiense CSA de prismas de concreto. Por otra parte la proporción de la mezcla con el contenido total de álcalis de 5.5 kg/m³ se asemeja al valor que se propone en el método de la AFNOR.

2.3.2.4.6. Métodos de Prismas de Concreto en Autoclave.

Kanazu et al. aplicaron el método propuesto por Tang et al. a prismas de concreto de dimensiones 100 x 100 x 360 mm. Se utilizaron 3 contenidos diferentes de álcalis 0.67%, 1.10% y 1.5% Na₂O equivalente, ajustando el contenido de álcalis adicionando NaOH al agua de mezclado. Kanazu obtuvo una expansión pequeña después de curar en vapor por un periodo de 10 horas a 90 °C, mientras que en autoclave se tienen mayores expansiones en 6 horas a 150 °C. Si se incrementa el contenido de álcalis a 1.1% o más, se facilita hacer una decisión sobre la reactividad potencial de los agregados. El método requiere de una intensa investigación para conocer su alcance.

2.3.3. Normatividad.

2.3.3.1. Introducción.

La normalización conocida en diferentes países sobre reactividad potencial adoptan uno de los siguientes enfoques para sus especificaciones. En el primero, e.g. Canadá, donde el objetivo es que el agregado que se use en el concreto no presente expansiones por reactividad álcali-silica al grado que sea perjudicial para el concreto. En el segundo, por la geología particular del país, el concreto tiene que elaborarse con agregados potencialmente reactivos, por lo que las normas proponen especificaciones para que el concreto se comporte normalmente con estos agregados, e.g. Inglaterra. Esta es una división muy general, en realidad la mayoría de los países incluyen especificaciones de los dos aspectos antes mencionados. En base a las recomendaciones de los diferentes países, se pueden clasificar de acuerdo al parámetro sobre el que ponen mayor énfasis:

-Evitar los agregados potencialmente reactivos: Canadá, Italia, México (NOM C-111), Noruega, Alemania, Australia.

-Modificar la proporción de la mezcla, limitar el contenido de álcalis del cemento o del concreto, y/o el uso de aditivos minerales cuando se trabaja con agregados potencialmente reactivos: Nueva Zelanda, Japón, Dinamarca, Argentina, Francia, Ex-URSS, Sudáfrica, E.U., Bélgica, Chipre, Islandia.

-Limitar el contenido de álcalis: Inglaterra e Irlanda.

Tabla 4. Alternativas para usar agregados potencialmente reactivos.

Alternativa	País
Usar de cementos bajos en álcalis	Noruega, Argentina, Alemania, Chipre.
Limitar el contenido de álcalis en el concreto	Nueva Zelanda, Irlanda, Dinamarca.
Usar aditivos minerales	Islandia, Italia, Australia, Canadá.
Usar cementos bajos en álcalis y/o usar aditivos	Estados Unidos, México.
Usar cementos bajos en álcalis o, limitar el contenido de álcalis en el concreto o, usar aditivos.	Japón, Francia, Inglaterra, Bélgica, Sudáfrica

Si no existe otra opción más que utilizar un agregado potencialmente reactivo, cada país propone alternativas para su uso como se indica en la tabla 4.

2.3.3.2. Cementos Bajos en Alcalis.

La mayoría de los países que especifican cementos bajos en álcalis han adoptado el límite de la norma ASTM C-227 de 0.80% Na₂O equivalente (Alemania, Argentina, Bélgica, Chipre, Estados Unidos, Inglaterra, Irlanda, Japón, México, Nueva Zelanda, Noruega, Sudáfrica, Ex-URSS). En Argentina e Inglaterra es una especificación opcional para los cementos Portland resistentes al ataque de sulfatos. Francia, Bélgica y algunas dependencias Inglesas clasifican a los cementos con mezclas de puzolana o puzolana y escoria granulada de alto horno equivalentes a cementos bajos en álcalis. Existen restricciones al contenido de álcalis para estos cementos.

2.3.3.3. Limitación del Contenido de Alcalis en el Concreto.

Límites. De los países que restringen el contenido de álcalis en el concreto, existen diferencias apreciables:

Nueva Zelanda	2.5 kg Na ₂ O _e /m ³
Bélgica, Japón, Inglaterra, URSS, México.	3.0
Francia	3.0 - 3.5
Irlanda	4.0 - 4.5 Si el agregado contiene carbonatos.

En Dinamarca dependiendo de la reactividad del agregado se define el contenido de álcalis que se permite en el concreto, con los siguientes intervalos:

$$\begin{aligned} \text{Na}_2\text{O} &< 1.8 \text{ kg/m}^3 \\ &> 1.8 \text{ kg/m}^3 < 3 \text{ kg/m}^3 \\ &> 3.0 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

En Sudáfrica se permiten contenidos de álcalis entre 2 y 4.5 kg/m³ de Na₂O_e dependiendo del origen del agregado.

Adicionalmente los países que incluyen especificaciones para limitar el contenido de álcalis en el concreto limitan los álcalis totales, es decir aquellos que provienen de otras fuentes además del cemento (agregados, agua de mezclado, aditivos minerales, etc.) y la variabilidad de los álcalis en el cemento.

2.3.3.4. Uso de Aditivos Minerales.

Muchos países proponen el uso de cementos con aditivos para reducir el riesgo de reactividad potencial. Existen algunas diferencias en la forma de usarlos.

Aditivos minerales permitidos. Las normas que indican los aditivos que se pueden usar se basan más en la disponibilidad local y familiaridad con el uso del aditivo que en su efectividad. La ceniza volante y la escoria granulada de alto horno son las más utilizadas en todos los países; Canadá, Australia, Sudáfrica, Bélgica y Dinamarca incluyen microsilíce; Italia, Ex-URSS, Francia e Islandia incluyen también puzolanas naturales.

Las proporciones de los aditivos no tienen ninguna restricción en la mayoría de los países. Sin embargo, el Departamento de Transporte de E.U. permite entre 20% y 30% de ceniza volante, y en Japón la cantidad del aditivo depende del contenido de álcalis del cemento que se utiliza en la mezcla. En Inglaterra se recomienda por la Sociedad del Concreto (Concrete Society) que el contenido del aditivo sea mayor a 25% del peso del cemento, además recomienda que el contenido de álcalis en el concreto no exceda de 3.0 kg/m³ de Na₂O_e; en Sudáfrica se recomienda 40% de escoria, 20% de ceniza volante y 15% de microsilíce. En Islandia se recomienda cuando menos 7%

de microsilíce o 25% de riolita triturada. En Dinamarca donde se proponen combinaciones de ceniza volante y microsilíce, estas no deben exceder el 35% del total del cementante y su uso se restringe para condiciones ambientales clasificadas como pasivas (ver siguiente inciso); el contenido de microsilíce debe ser menor a 10%. Esta última especificación se usa también en Bélgica.

Para evaluar el comportamiento del aditivo en la mezcla se utiliza la norma ASTM C441¹⁰⁵ en Nueva Zelanda e Islandia; México utiliza la norma NOM C-298¹⁰⁰, similar a la norma ASTM C-441; en Canadá se usa la prueba de expansión de prismas de concreto utilizando el aditivo (CAN A23-2-14A), considerando como perjudicial una expansión mayor a 0.04% a un año. En E.U. se toma como máximo 1.5% de álcalis totales de acuerdo con la prueba C311, además de someter a la prueba de expansión a las barras de mortero elaboradas con vidrio pyrex y ceniza volante, curadas a 38 °C. Sudáfrica especifica un límite de 1.5% de álcalis totales, además de 0.1% como límite para las barras elaboradas con el aditivo que se quiera probar, curadas a 80 °C en una solución de NaOH.

2.3.3.5. Tipo de Estructura y Condiciones Climáticas.

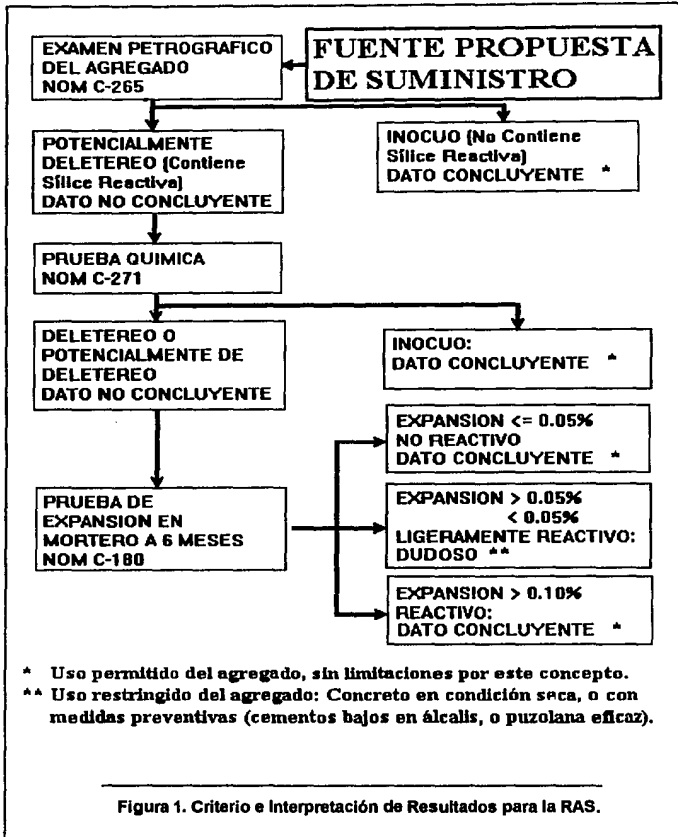
La mayoría de las especificaciones sostienen la idea de que el concreto que estará expuesto a un ambiente seco y que permanezca así, no se requieren tomar precauciones para reactividad potencial. Sin embargo algunos países han desarrollado especificaciones relacionándolas con las condiciones climáticas y el tipo de estructura. Francia divide a las estructuras en tres clases: clase III, estructuras muy importantes (presas, edificios grandes, nucleoelectricas, etc.) en las cuales se deben tomar precauciones para reactividad potencial independientemente de las condiciones ambientales; clase II, estructuras generales, en donde se deben tomar precauciones para reactividad potencial si se someten a un ambiente severo para reactividad potencial; clase I, estructuras que no requieren ninguna precaución para reactividad potencial.

Las especificaciones sobre concreto de Dinamarca divide las condiciones ambientales en 3 tipos: a) Pasiva, es un medio ambiente seco, sin presencia de sustancias agresivas, elementos en el interior de los edificios; b) moderada, es un ambiente húmedo, elementos dentro y fuera del edificio; c) agresivo, donde existen sales y humo, agua de mar o aguas salinas. Las pruebas al agregado y el contenido de álcalis permitido están en función del medio ambiente al cual estará expuesto el concreto.

2.3.4. Procedimientos para Evitar o Disminuir la Reacción Alcali-Silíce.

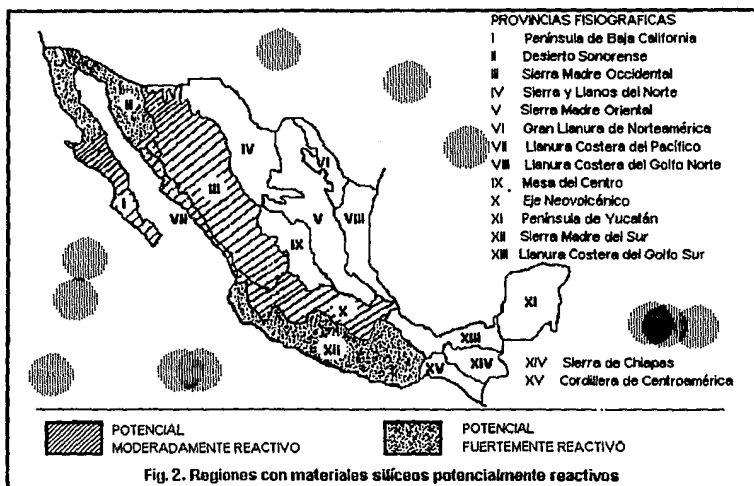
Cuando en el diagnóstico del deterioro de una estructura se concluye que es ocasionado por la reacción alcali-silíce, o esta juega un papel importante en el deterioro, no existen actualmente medios para eliminar la reacción del concreto. Para estas situaciones, se han hecho esfuerzos por modificar las condiciones de exposición al medio de la estructura, aislándolo de la humedad y de sustancias agresivas (sales), manteniendo seca la superficie. Para lograr lo anterior se han utilizado

recubrimientos de diferentes tipos, algunos con resultados aceptables, pero en realidad aún se necesita desarrollar un medio efectivo para mantener a la estructura o elemento afectado por la reacción álcali-silíce, en condiciones adecuadas para evitar o disminuir el desarrollo de la reacción.



Cuando se sabe que el agregado es potencialmente reactivo se pueden implementar una serie de medidas para disminuir el riesgo de reactividad álcali-silíce; en general estas medidas tratan de modificar algunos de los parámetros que participan en la reacción y eliminar la "proporción pésima".

Existen diagramas de decisión para auxiliar en el diagnóstico de un agregado que se pretenda usar en la fabricación de concreto, se presenta (fig. 1) el diagrama de decisión que se propone en el anteproyecto de norma oficial mexicana NOM-C-111⁹⁴, que en general es similar a los propuestos por varios países e investigadores, en particular los desarrollados en Canadá y E.U., solamente adaptados a las condiciones en México. En la figura 2 se presenta la carta geográfica de las regiones en México con materiales silíceos potencialmente reactivos con los álcalis.



Es recomendable realizar un examen petrográfico antes de cualquier otra prueba, que como se ha mencionado, sirve para orientar la evaluación del material de acuerdo a los minerales o rocas que lo constituyen y seleccionar las pruebas más adecuadas, para evaluar al agregado y determinar su carácter reactivo o inocuo.

Cuando se han realizado todas las pruebas necesarias de acuerdo a un diagrama de flujo para confirmar que el agregado es potencialmente reactivo, se tienen 3 opciones para prevenir el riesgo de RAS, a) utilizar otro agregado no reactivo, b) usar cemento con bajo contenido de álcalis, y c) usar aditivos minerales o puzolanas. Cualquiera puede tener resultados apropiados. Sin embargo, se ha probado que cementos bajos en álcalis pueden provocar RAS en el concreto, también se ha comprobado que algunas puzolanas no evitan la RAS en el concreto eficientemente; es decir, la única opción que elimina el riesgo es utilizar otra fuente de agregado, las dos opciones restantes reducen el riesgo más no lo eliminan.

A pesar de la multitud de estudios que se han realizado sobre el beneficio de las puzolanas para disminuir las expansiones provocadas por la reacción, existen algunos aspectos del mecanismo de la reacción y del control sobre la expansión que no están muy claros. De la misma forma, existen diferentes opiniones sobre la efectividad de los aditivos minerales (escoria, ceniza volante) para reducir las expansiones por RAS, e incluso algunos investigadores reportan que en ciertos casos estas sustancias no solo son ineficientes sino que aún más perjudiciales. En conclusión, las sustancias y mezclas de aditivos minerales pueden ayudar a disminuir los riesgos de una expansión por RAS, si se utilizan en la proporción adecuada y se hace una evaluación previa de su efectividad en laboratorio.

CAPITULO III.

METODO DEL GEL FLUORESCENTE PARA LA IDENTIFICACION IN SITU DE LA REACCION ALCALI-SILICE.

Sinopsis.

La metodología para un diagnóstico positivo de la RAS exige la determinación de ciertos productos o síntomas típicos de esta presentes en el concreto; la presencia del gel álcali-silíce en el concreto es señal inequívoca de la existencia de la RAS. La necesidad de identificación de los rasgos, exige de pruebas confiables y de resultados inmediatos. Se describe en el presente capítulo el método del gel fluorescente (MGF) para identificar los productos amorfos de la reacción álcali-silíce. Se presentan los principios del método, el equipo y materiales necesarios para emplearlo.

3.1. ANTECEDENTES.

Como se ha establecido el producto de la RAS es una sustancia sólida heterogénea que se presenta por la reacción entre las partículas del agregado reactivo y los álcalis de la solución de poro del concreto. Como tal, se puede dar seguimiento al desarrollo de la reacción a través de conocer: a) la cantidad de material reactivo remanente, b) la cantidad de material reactivo disuelto remanente, y c) la cantidad de los productos de la reacción acumulados.

Los productos de la reacción no tienen la misma localización dentro del concreto, depende del tipo de agregado y del grado de desarrollo de la reacción, en general se pueden localizar: 1) Entre el agregado y la pasta, en el caso de materiales con textura gruesa como las cuarcitas o, 2) Llenando las microfisuras en el caso de materiales con textura muy fina, tales como algunas arcillas silíceas, pedernal u ópalo.

3.2. METODO DEL GEL FLUORESCENTE ^{54, 55, 56, 57, 58}.

Existen métodos para cuantificar la cantidad de material reactivo disuelto remanente en el concreto, pero no así para cuantificar la cantidad de los productos de la reacción. Cualquier método para determinar esto último requiere de un procedimiento para identificar los productos de la reacción in situ.

Los métodos actuales para lograr un diagnóstico positivo de la RAS requieren de personal calificado, y en su caso, de un petrógrafo con experiencia, equipo de laboratorio sofisticado, y se deben analizar un gran número de muestras para obtener resultados estadísticamente significativos, consumen tiempo, y tienen un costo considerable.

En respuesta a la necesidad de un medio sencillo, rápido y preciso de identificación de los productos de la reacción álcali-silíce, se han desarrollado técnicas para la identificación del gel a través de "teñir" al concreto con ciertas sustancias y luego identificar el gel por el tinte particular que logra al contacto con la sustancia. Poole⁷¹ propuso una técnica de este tipo, el método consiste en saturar el gel en una solución de sulfato de cupramonio, dejar que el gel absorba los iones de cobre, y después de lavar, el gel se visualiza con un color azulado; además, Poole señala que la cantidad de cobre absorbido del sulfato de cupramonio es directamente proporcional al volumen del gel en un momento determinado.

Otra técnica que es similar en concepto fué desarrollada en la Universidad de Cornell en 1988 por Kumar Nataesayer y Keneth C. Hover, esta técnica ha dado buenos resultados para identificar los productos de la reacción e incluso como instrumento forense en algunas estructuras que se han demolido. En esencia, el método consiste en identificar el gel de la RAS impregnado con una solución de uranilo, y observar la fluorescencia del gel iluminándolo con luz ultravioleta.

3.2.1. Principio del Método.

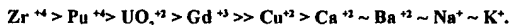
La composición del gel álcali-silíce se ha estudiado usando microscopía electrónica, difracción de rayos X, y método óptico de electrones, y se sabe, como se indicó en el capítulo I, que se forma principalmente de silicatos alcalinos amorfos con cantidades menores de silicatos cristalizados, también se encuentran presentes cantidades variables de calcio y algunas veces C-S-H.

El objetivo del método es que estos productos sean visualizados como gel, por medio de cationes metálicos absorbidos, o como una coagulación de los hidróxidos metálicos cargados positivamente y la silíce coloidal (gel) negativamente cargada.

El gel silicato, como el que se forma en el concreto debido a la RAS, absorbe algunos cationes muy fuertemente. Si los iones de Na^+ , K^+ y Ca^{+2} , que se encuentran presentes en la solución de poro del concreto, y que son normalmente absorbidos por los productos de la RAS, son reemplazados por otros cationes que sean fácilmente identificables, los productos de la RAS pueden ser "marcados" e identificados in situ. La solución que se escogiera para impregnar al gel, no debía reaccionar o absorber ningún otro material típicamente presente en el concreto, especialmente los productos de la hidratación del cemento.

La química del sílice, el origen y naturaleza de la superficie cargada y las propiedades de absorción de la superficie de la sílice se han investigado profundamente. Como resultado de estas investigaciones se sabe que la superficie de la sílice posee propiedades de intercambio catiónico que dependen del pH de la solución y de la naturaleza del electrolito. De hecho, la absorción y propiedades de intercambio iónico de la superficie de sílice son las bases del uso del gel silicato como soporte cromatográfico.

Patrick y Barclay en 1925 demostraron que los iones de Na^+ pueden ser reemplazados por Ag^+ , Cu^{+2} , o Fe^{+2} , tratando el gel con soluciones diluidas de las correspondientes sales metálicas. En un estudio más amplio Kolhoff y Stenger demostraron que los iones de Ca y Cu son absorbidos fuertemente por el gel, y que el cobre en particular fué absorbido de una solución de amoníaco, tiñiendo de azul oscuro al gel -en esta propiedad se basa Poole para teñir los productos de la reacción álcali-sílica-. Strazhesko et. al. demostraron que independientemente de si el calcio o el sodio son absorbidos primero por el gel, todos los 11 cationes metálicos raros de la tierra los reemplazaban. Ahrland et. al. investigaron las propiedades de intercambio iónico del gel silicato con algunos cationes y demostraron que la afinidad del gel silicato por cationes puede expresarse como sigue:



En otras palabras el Zirconio es más fuertemente absorbido que el plutonio, que es más fuertemente absorbido que el uranio, y así sucesivamente.

Por lo tanto, existe una amplia variedad de cationes que pueden reemplazar cationes previamente absorbidos en el gel silicato. El MGF utiliza el ión Uranilo (UO_2^{+2}) por las siguientes razones:

- 1) El ión uranilo reemplaza iones de calcio, potasio o sodio previamente absorbidos.
- 2) La absorción del ión uranilo es muy rápida y la reacción se completa en menos de 5 minutos.

3) El ión de uranio es fluorescente y en consecuencia fácil de identificar.

3.2.2. Procedimiento y materiales.

3.2.2.1. Procedimiento.

Se realizan los siguientes pasos para someter a prueba un espécimen de concreto:

-Lavar con agua destilada.

-Colocar en una solución de acetato de uranio, o impregnarlo de la solución con un atomizador de tal manera que se humedezca completamente la zona de prueba. Utilizar un atomizador es más apropiado, porque se evita contaminar la solución y pueda utilizarse posteriormente.

-Esperar 10 minutos para que se absorba el ión uranio en la superficie del gel de sílice.

-Lavar nuevamente con agua destilada.

-Exponer al espécimen a luz ultravioleta en un cuarto oscuro.

-Observar la existencia de zonas de color verde-amarillo fluorescentes características de la excitación del uranio.

3.2.2.2. Materiales.

La solución de acetato de uranio se prepara mezclando 10 gr de la sal de uranio en 100 ml de solución de ácido acético, calentando la mezcla hasta que se diluyan las sales. La solución de ácido acético se prepara mezclando 5 ml de ácido acético al 30% en 95 ml de agua destilada. Por último la solución de acetato de uranio se guarda en un recipiente apropiado. El acetato de uranio es tóxico por lo que debe manejarse con cuidado.

La lámpara de luz ultravioleta que se utilizó es de onda corta de marca Spectronics Corporation, del tipo Spectroline (EF-280C UV-C) de fabricación americana con dos luminarias de luz ultravioleta de 8 watts y filtro. La lámpara tiene una intensidad de 1100 mW/cm² a 15 cm de distancia. Cabe mencionar que el uranio se excita mejor bajo luz ultravioleta de honda corta en el rango de 1800 a 2800 Å.

La presencia del gel de sílice se indica por la fluorescencia característica del ión de uranio absorbido, bajo la luz ultravioleta de onda corta presenta un color verde-amarillo fluorescente. El uranio en solución no es fluorescente y las sales de uranio no absorbidas presentan un color verde

opaco fluorescente. Las zonas que fluorescen de forma más brillante son las que han absorbido el ión uranilo, y como los iones de uranio reemplazan a los iones de Na^+ , K^+ y Ca^{+2} previamente absorbidos, se concluye que estas son las zonas donde se encuentra presente el gel. Así el método sirve para identificar la localización y cantidad del gel existente. Existen ciertos productos alterados de la reacción cuya composición cae dentro de la conocida del gel y que no absorben el ión uranilo, se ha probado que estos productos no son ni carbonatos de calcio o carbonatos alcalinos; por lo que solo los productos coloidales de la reacción álcali-silice (gel) que absorben una cantidad mayor de iones de uranio son identificados con este método. Se debe realizar mayor investigación para determinar con precisión los productos que fluorescen débilmente. La precipitación de la solución de uranilo conforme se seca el espécimen también produce una fluorescencia que puede ser equivocadamente identificada como presencia del gel de sílice. Esto ocurre después de una hora de secado, por esto se recomienda que los especímenes se observen dentro de una hora después de aplicar la solución de uranilo.

Este método identifica los productos de la reacción de agregados silíceos reactivos con los álcalis con éxito, como: ópalo, pedernal, cuarcitas, riolitas, andesitas, gneiss graníticos, argillitas y grauvacas; como el método esta basado en la composición química de los productos de la reacción y no en la del agregado, se piensa que identifica el gel de la RAS de cualquier material silíceo reactivo y los álcalis, es decir, los productos de la reacción álcali-silice y álcali-silicato.

CAPITULO IV.

ESTUDIOS DE APLICACION DEL METODO DEL GEL FLUORESCENTE.

Sinopsis.

Se describen las pruebas realizadas con el método del gel fluorescente (MGF) para identificar los productos amorfos de la reacción álcali-silíce. Se presentan los resultados de las observaciones en barras de mortero en laboratorio y las efectuadas en concretos en campo. Se discuten los resultados de las pruebas de expansión, de petrografía y microscopio electrónico de barrido para estudiar las zonas reconocidas con fluorescencia previamente.

4.1. INTRODUCCION Y PROCEDIMIENTO GENERAL DEL EXPERIMENTO.

Para aplicar el método se elaboraron barras de mortero con agregados reactivos e inocuos. Los daños en el concreto causados por la reacción álcali-silíce toma años en ocurrir, así también los productos de la reacción. Para reproducir los productos de la reacción -gel álcali-silíce- en condiciones controladas, se utilizó el método acelerado de barras de mortero de la NBRI, basados en los estudios realizados por Davies y Oberholster⁶⁴ en donde demuestran que esta prueba únicamente acelera el proceso y no altera el mecanismo de la reacción ni la composición de los productos de esta⁶⁵.

Se hicieron observaciones en campo en núcleos de concreto de una estructura, donde se diagnosticó RAS previamente, los corazones tienen una edad desde el momento de su extracción aproximada de 17 años y se han mantenido en un cuarto de curado a temperatura y humedad constantes. El diagnóstico positivo de la RAS en la estructura fué reciente.

Para verificar los productos detectados por el MGF⁵⁵ se realizaron una serie de pruebas y estudios sobre los agregados y barras de mortero. Se llevaron a cabo pruebas químicas en los agregados para conocer su composición y reactividad potencial. Estudios de petrografía en las

barras de mortero para identificar zonas de la reacción y los materiales que constituyen al agregado. Las zonas que presentaban productos de la RAS de acuerdo con el MGF, se marcaron y se realizaron estudios de microscopía electrónica de barrido para identificar los productos de la reacción, estos se compararon con los obtenidos por algunos investigadores.

Los resultados de las pruebas de expansión se utilizaron para estudiar si existía alguna relación entre la magnitud de la expansión registrada y la cantidad de productos de la reacción (gel álcali-silice) identificados con el MGF.

4.2. ELABORACION DE LAS BARRAS Y PRUEBA DE EXPANSION.

Se elaboraron especímenes utilizando como base el método canadiense CSA CAN3-A23.2-XXC³⁵ -este método es una modificación del método acelerado NBRI⁸⁴, (Standard Test Method for Accelerated Detention of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bars Due to Alkali-Silica Reaction), con algunas modificaciones con el objeto de simplificar la realización de las barras, y reducir el tiempo.

Esta prueba involucra materiales, equipo, y operaciones de riesgo. Por lo que se tomaron todas las medidas de seguridad y sanidad adecuadas previamente a realizar las barras.

4.2.1. Equipo:

- Se utilizaron de acuerdo con la norma ASTM C490¹⁰⁹.

- Los recipientes se elaboraron con tubo de PVC, los bastidores interiores para las barras se elaboraron de un material de acrílico y acero, se hicieron pruebas preliminares y se comprobó que resistían la exposición prolongada en soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) a 80 °C. Los recipientes tienen un diámetro de 10 cm y una altura de 40 cm.

-Horno. Se utilizó un horno de marca Felice de fabricación Mexicana, con una rango de variación de ± 2 °C.

-El comparador de longitud es de la marca SOILTEST CT384, de fabricación americana.

4.2.2. Soluciones:

-Se utilizó agua destilada.

-Cada litro de la solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) se elaboró de la forma siguiente: Se agregaron 40.0 gr de hidróxido de sodio disuelto en 900 ml de agua, se agitó para disolver las sales, y se le agregó agua para completar 1 litro. El Hidróxido de Sodio puede causar quemaduras severas en la piel y dañar la vista, por lo que se utilizó equipo apropiado de protección.

-Se utilizó una proporción de 4:1 del volumen de la solución de hidróxido de sodio a volumen de la probeta de mortero.

-Las dimensiones de las barras son (2.5x2.5x28.5), lo que da un volumen de barra de 184 ml, por lo tanto, por cada probeta se agregaron 736 ml de solución de NaOH.

4.2.3. Temperatura y Humedad:

-La temperatura del cuarto de moldeo y de materiales se mantuvo como indica la norma mencionada, así mismo la humedad relativa del cuarto de moldeo.

-El horno de almacenaje se controló a una temperatura de 80 ± 2 °C durante la prueba.

4.2.4. Selección y preparación de los materiales.

Selección del agregado. Se utilizaron 5 arenas y 1 grava, de bancos conocidos, en la tabla 1 se muestra su procedencia.

TABLA 1. Procedencia de los Agregados.

A1	ARENA DEL ESTADO DE MEXICO BANCO: SANTE FE.
A2	GRAVA DE GUADALAJARA, JAL.
A3	ARENA DE TAMUIN, HGO.
B1	ARENA DE HUICHAPAN, HGO. BANCO: EL HALCON.
B2	ARENA DE CUERNAVACA, MOR. BANCO: EL NOPAL.
B3	ARENA DE HUAXTLA, TLAX. BANCO: HUAXTLA LAS TORTUGAS.

Se procesaron para una granulometría según la Tabla 2, sin ninguna trituración excepto para la grava. La grava A2, se trituró para producir un producto graduado del cual se extrajo la muestra según la granulometría que se prescribe en la Tabla 2.

TABLA 2. Requisitos de Granulometría.

PASA	RETENIDO	PESO (g)
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	10
2.36 mm (No. 8)	2.36 mm (No. 8)	25
2.36 mm (No. 8)	0.600 mm (No. 30)	25
0.600 mm (No. 30)	0.300 mm (No. 50)	25
0.300 mm (No. 50)	0.150 mm (No. 100)	15

4.2.4.1. Preparación del agregado.

Se realizó de acuerdo a la norma excepto que después de que el agregado se separó en los diferentes tamaños, no se efectuó el lavado de cada tamaño con un chorro de agua sobre la criba para remover polvo y partículas finas del agregado.

4.2.5. Selección y preparación del cemento. Se utilizaron 2 cementos portland comerciales de acuerdo a la norma (NOM C180)⁴⁵:

1. Cemento tipo I con un contenido de álcalis de 0.30% como Na_2O_e .
2. Cemento tipo II con puzolana con un contenido de álcalis de 1.10% como Na_2O_e .

TABLA 3. Análisis químicos del cemento.

Sustancia	Cemento 1	Cemento 2
SiO ₂ , Sílice	22.0	14.50
Al ₂ O ₃ , Alúmina	5.0	3.90
Fe ₂ O ₃ , Óxido Férrico	3.4	2.20
CaO, Cal combinada	60.0	43.40
CaO, Cal libre	0.9	0.74
MgO, Magnesio	1.2	0.90
SO ₃ , Anhídrido sulfúrico	2.7	3.40
Residuo insoluble	1.8	23.90
Pérdida por calcinación	2.9	5.50
Suma	99.9	98.44
Na ₂ O, Óxido de Sodio	0.09	0.85
K ₂ O, Óxido de Potasio	0.32	0.55
Total Álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$)	0.30	1.11

Los resultados del análisis químico de los cementos se presenta en la tabla 3. Cabe hacer la aclaración que el contenido de álcalis del cemento no influye en los resultados debido a que las barras son sumergidas en la solución de NaOH, así el contenido de álcalis del cemento tiene una influencia despreciable en la expansión. (Fournier & Bérubé²; Hooton & Rogers³⁷).

El cemento se cribó a través de la malla 1.25 mm para remover grumos.

4.2.6. Preparación de los especímenes.

4.2.6.1. Número de especímenes y mezclas.

Se realizaron 3 barras por cada combinación de cemento-agregado. Las combinaciones que se realizaron fueron como se indica en la tabla 4.

TABLA 4. Identificación de las combinaciones Cemento-Agregado.

Cemento (Tipo)	Agregado (Grupo)	Grupo Cemento-Agregado
1	A	1A1
		1A2
	B	1B1
		1B2
		1B3
	2	A
2A2		
2A3		
B		2B1
		2B2
		2B3

Las combinaciones cemento-agregado se identificaron de la forma siguiente, el primer carácter es un número que indica el tipo de cemento (1 o 2), ver inciso 2.5; y los 2 caracteres siguientes identifican al agregado (una letra y un número), de acuerdo al inciso 2.4.

Se preparan los moldes de acuerdo con la norma ASTM C490¹⁰⁹ excepto que el interior de los moldes se cubrió ligeramente con aceite.

4.2.7. Preparación del mortero.

Se hizo la proporción de los materiales secos para el mortero de prueba por masa, usando 1 parte de cemento por 2.25 partes de agregado. La cantidad de materiales secos que se mezcló a la vez para hacer tres especímenes, fué de 440 gr de cemento y 990 gr de agregado preparado con la combinación de los porcentajes retenidos de los varios tamaños, según la granulometría indicada en la tabla 1. Se utilizó una relación agua-cemento constante en lugar de la mesa de fluidez, ya que se ha demostrado que la expansión en las barras es menos variable cuando se utiliza una relación agua-cemento constante, que cuando se usa la mesa de fluidez. Para las arenas se utilizó una relación agua-cemento igual a 0.44 por masa. Para la grava de Guadalajara se utilizó una relación agua-cemento igual a 0.5. Con lo anterior

el contenido de agua para las barras fué de 194 ml por cada 440 g de cemento para una relación de 0.44, y de 220 ml por cada 440 gr de cemento para la relación de 0.5. En general esta relación agua-cemento dio una manejabilidad aceptable en la mayoría de las barras.

El procedimiento para mezclar el mortero y la secuencia de fabricación de las barras se realizó de acuerdo a la norma.

4.2.8. Almacenamiento y medición.

Después de que cada molde se llenó con el mortero, se colocó inmediatamente en el cuarto húmedo. Se dejaron las barras en los moldes durante 24 horas. Después se desmoldearon, protegiéndolos de la pérdida de humedad, y se identificaron con tinta indeleble. Se traspasaron los especímenes a los recipientes con agua suficiente para sumergirlos totalmente. Se sellaron y colocaron en el horno a 80 °C por un periodo de 24 horas.

Medición inicial. Para la lectura cero de los especímenes, los recipientes se sacaron del horno uno a la vez. Se sacaron las barras del agua una a la vez del recipiente y se secaron con una toalla, cuidando de no alterar los índices de referencia. La lectura cero (inicial) de cada prisma se realizó inmediatamente después de secarlo. Después de realizar la lectura, la barra se dejó en una toalla hasta que el resto de las barras fueron medidas, luego se colocaron en otro recipiente que contenía la solución de 1N NaOH a 80 ± 2 °C, separadas por un bastidor y sumergidas totalmente en la solución. Se cerró el recipiente y se regresó al horno. El proceso se repitió para el resto de los recipientes.

Almacenamiento subsecuente y medición. Para las lecturas subsecuentes de los especímenes se cumplió con la norma al realizar al menos 3 lecturas dentro de los 14 días (ver tabla 6) siguientes a la lectura cero (inicial), aproximadamente a la misma hora del día. El procedimiento para las lecturas subsecuentes se realizó igual al descrito en el inciso anterior excepto que los especímenes regresaron a su propio recipiente después de hacer la lectura.

Transcurridos 14 días los especímenes fueron lavados con agua destilada, y después de hacer las observaciones generales del aspecto de las barras se envolvieron con bolsas de polietileno y se guardaron en un cuarto de curado a 23 °C y 100% de H.R., hasta el momento de las observaciones.

4.2.9. Resultados.

Algunas barras presentaron exudaciones blancas, manchas de un tono café oscuro opaco y fisuras, pero ninguna presentó alabeo.

Se perdieron 2 barras durante la prueba, una barra del grupo 1B2 y una del grupo 2A2.

En la tabla 5 se presenta el reporte de las características de las barras después de terminada la prueba de expansión.

TABLA 5. Observaciones de las barras después de la prueba de expansión.

Grupo (Barras)	Color	Textura	Fisuras	Alabeo	Exudaciones	Manchas
1A1	Gris oscuro	Porosa	Muy delgadas, superficiales	Nb	Nb	Nb
1A2	Gris oscuro	Uniforme sin poros	Muy delgadas, superficiales	Nb	Nb	Nb
1B1	Gris oscuro	Poco porosa	Delgadas en toda la barra (0.5 mm) alguna de 3 o 4 mm de profundidad. Se notan más de forma longitudinal, pero también existen transversales; con el manejo algunos pedazos se desprendieron.	Nb	Nb	Manchas blanquecinas y color café
1B2	Gris claro	Lisa, poco porosa	Pocas y muy delgadas	Nb	Nb	Blanquecinas y café opaco en los extremos
1B3	Gris	Porosa	Ninguna	Nb	Nb	Opacas café-verdoso oscuras
2A1	Gris oscuro	Porosa	Ninguna	Nb	Nb	Nb
2A2	Gris claro	Lisa, poco porosa	Ninguna	Nb	Nb	Blanquecinas en toda la barra, café opaco en los extremos
2A3	Gris opaco	Poco porosa	Ninguna	Nb	Nb	Puntos blanquecinos y café opaco
2B1	Gris oscuro	Lisa	Ninguna	Nb	Especie de gelatina transparente	Blanquecinas en toda la barra, café opaco en los extremos
2B2	Gris	Lisa, algunos poros	Ninguna	Nb	Especie de gelatina transparente	Blanquecinas en toda la barra, gris claro y alrededor de poros
2B3	Gris	Muy porosa	Ninguna	Nb	Nb	Manchas café claro en toda la barra

Se calculó la diferencia entre la longitud inicial (lectura cero) del espécimen y la longitud en cada periodo de medición y se dividió entre la lectura inicial, esto se registró como la expansión del espécimen en ese período. Se registró el promedio de la expansión de los 3 especímenes de cada combinación cemento-agregado al próximo 0.01 por ciento, y se tomó como la expansión de la combinación en el período dado. Los resultados se presentan en la tabla 6.

TABLA 6. Expansiones de las barras durante la prueba (días) y total.														
Grupo	Inicio	2o.	3o.	4o.	5o.	6o.	7o.	8o.	9o.	10o.	11o.	12o.	13o.	14o.
1A1	0.00%	0.00%	--	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	--	0.02%	--	0.04%	--	0.04%	0.04%
1A2	0.00%	0.03%	0.06%	--	0.16%	--	0.26%	0.30%	--	0.38%	--	--	--	0.81%
1B1	0.00%	0.02%	0.02%	--	0.08%	--	0.16%	0.19%	--	0.28%	--	--	--	0.41%
1B2	0.00%	0.02%	--	0.05%	--	0.11%	0.15%	--	0.20%	--	--	--	0.31%	0.33%
1B3	0.00%	0.03%	0.00%	--	0.00%	0.01	--	0.01%	--	--	--	0.01%	--	0.01%
2A1	0.00%	--	--	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	--	0.06%	--	0.06%	--	0.06%	0.07%
2A2	0.00%	0.03%	--	0.00%	--	0.01%	0.02%	--	0.02%	--	--	--	0.03%	0.06%
2A3	0.00%	--	0.00%	--	-0.01	0.01%	--	0.02%	--	--	--	0.01%	--	0.02%
2B1	0.00%	0.00%	--	0.00%	--	0.01%	0.02%	--	0.02%	--	--	--	0.03%	0.03%
2B2	0.00%	0.01%	0.01%	--	0.01%	--	0.01%	0.03%	--	0.03%	--	--	--	0.04%
2B3	0.00%	--	0.01%	--	0.01%	0.02%	--	0.02%	--	--	--	0.03%	--	0.03%

* Expansiones mayores que el límite

Si la expansión promedio de los especímenes de prueba excede de 0.20% a los 16 días después del moldeado (14 días después de la lectura inicial), es indicativo de poder presentar una expansión perjudicial. Existen todavía discrepancias sobre los límites que deben aplicarse en este método. Cuando la expansión promedio de los especímenes es menor que 0.10% a los 16 días después del moldeado, indica que el agregado es inocuo. Cuando la expansión promedio de los especímenes es mayor que 0.10% y menor que 0.20% a los 16 días después del moldeado, los resultados se consideran inconclusos y se deben realizar más pruebas al agregado para determinar su carácter de reactividad potencial

4.3. ANALISIS QUIMICOS.

Se realizó la prueba química para reactividad potencial de acuerdo a la norma NOMC-271 en los agregados B1, B2, Y B3. Los resultados de la prueba se presentan en la Tabla 7. Las 3 arenas se clasificaron como agregados perjudiciales; sin embargo todas se encuentran muy cerca de la

TABLA 7. Resultados de los ensayos químicos.

Agregado	Silice Disuelta	Reducción en Alcalinidad	Resultado
B2	61	45	Agregado Perjudicial
B1	127	90	Agregado Perjudicial
B3	232	124	Agregado Perjudicial

frontera de la clasificación entre agregado perjudicial y agregado inocuo. Esto es importante considerarlo ya que la gráfica es una copia de la que propone la norma americana ASTM C-289-87, elaborada para condiciones y materiales diferentes a los que hay en México, además de las limitaciones del método para evaluar ciertos agregados.

4.4. ESTUDIOS PETROGRAFICOS DE LAS BARRAS.

Los resultados de la petrografía realizada en algunas de las barras (1A2, 1B1, 1B2, 2B1 y 2B2), son los siguientes :

Probeta 1A2.

La muestra está integrada por una serie de líticos de composición intermedia constituida por cristales eudrales tabulares de plagioclasas pertenecientes a la familia de la Labradorita-Andesita, así como fenocristales de Olivino y Augita inmersos en una matriz microlítica de Plagioclasas de la misma composición, los clastos presentan textura porfídica, forma irregular y su tamaño oscila entre 1700 y 2800 micras, algunos de éstos clastos presentan oxidación de carácter supergénico.

El agregado fino lo conforman fragmentos líticos con las mismas características del agregado grueso, descrito anteriormente, con un promedio en tamaño de 500 micras y por cristales anedrales de Piroxenos y Plagioclasas distribuidas aleatoriamente en toda la muestra.

Los constituyentes están soportados por una pasta de color pardo con luz paralela y pardo oscuro con luz polarizada, se observan incluidos microcristales con alta birrefringencia.

En forma esporádica se presentan poros de forma esférica, con tamaños en promedio de 350 micras.

Probeta 1B1.

El agregado grueso se encuentra constituido por fragmentos de roca de composición intermedia, los cuales presentan fenocristales tabulares de Plagioclasas de composición intermedia, pertenecientes a la familia de la Labradorita-Andesita, cristales subrenales de olivino, Piroxenos y Hornblenda, incluidos en la matriz microlítica de Plagioclasas de la misma composición, textura porfídica, los tamaños de los fragmentos oscila entre 1300 y 2000 micras. En algunos clastos se observa una ligera alteración a Hematita-Limonita.

La fracción fina la constituyen clastos de la misma composición que el agregado grueso y fragmentos de cristales subrenales de Plagioclasas, Hornblenda, Olivino y Piroxenos, distribuidos aleatoriamente en toda la muestra.

Estas fracciones se encuentran unidas por una pasta de color pardo con luz paralela y pardo oscuro con luz polarizada.

Se observan poros de forma esférica y semiesférica con variación de tamaño que van de 350 micras a 1200 micras, así como microfisuramiento sin orientación preferencial, restringidos a la pasta. Algunos clastos se presentan cubiertos por la pasta debido a una ligera expansión de la misma. En la figura 1 se observan los poros interconectados por un microfisuramiento, sin presentarse la precipitación del gel de reacción en estas.

Probeta 1B2.

La fracción gruesa de la muestra esta constituida por una serie de rocas volcánicas que se clasifican como Basaltos, Andesitas y Tobas, presentando en general fenocristales eudrales de formas tabulares de Plagioclasas de composición intermedia pertenecientes a la familia de la Labradorita-Andesina, incluidas en una matriz feldespática y/o microlítica, como minerales accesorios se presentan cristales subedrales de Hornblenda y Piroxenos, el tamaño promedio de los clastos es de 2000 micras.

Se presentan en forma esporádica una oxidación en algunos clastos. La fracción fina se constituye por fragmentos líticos de rocas extrusivas de composición similar a las de la fracción gruesa y fragmentos de cristales de Plagioclasas y Anfíboles dispersos en toda la muestra, el tamaño de grano varía entre 150 y 500 micras. La pasta que soporta a los áridos es de color pardo con luz paralela y polarizada, existe una marcada recristalización de esta, el contacto con los agregados se da por un borde de reacción.



Figura 1



Figura 2

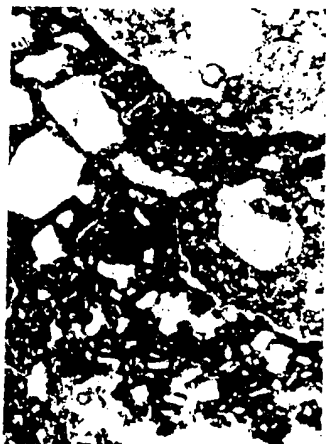


Figura 3



Figura 4

En la figura 3 tomada con luz polarizada se observa en la porción superior un clasto de roca volcánica con un borde incipiente de reacción y la marcada recristalización de la pasta.

Probeta 2B1.

La fracción gruesa esta constituida por clastos de rocas ígneas de composición intermedia que presenta fenocristales tabulares de Labradorita-Andesita, Hornblenda, Augita y Olivino, incluidos en una matriz microlítica de Plagioclasas de composición intermedia, presenta textura porfídica y el tamaño de este agregado varía entre 700 y 1500 micras, algunos clastos presentan una marcada oxidación de carácter supergénico.

A su vez la fracción fina se conforma por fragmentos de los mismos líticos que la fracción gruesa y por fragmentos de cristales de Labradorita, Andesita, Hornblenda y Augita, el tamaño promedio del agregado es de 300 micras y se encuentra distribuido aleatoriamente en toda la muestra.

Los constituyentes descritos están unidos por una pasta de color pardo oscuro con luz paralela y polarizada perdiendo la propiedad de isotropía de una pasta normal.

En forma general se encuentran poros de formas esféricas distribuidas en toda la pasta cuyos tamaños varían de 400 a 700 micras.

Se presenta un microfisuramiento sin dirección preferencial relleno por un gel como producto de alteración.

En la figura 2 se observa un fracturamiento con relleno que corre de arriba hacia abajo delimitándose en el contacto con los agregados, se presentan poros de forma esférica sin relleno alguno en la parte izquierda de esta.

Probeta 2B2.

En esta probeta se distingue que las fracciones gruesa y fina que constituyen este ejemplar se encuentran conformadas por clastos de rocas eruptivas de composición intermedia, con textura porfídica y cuya mineralogía presente es de fenocristales tabulares de Plagioclasas pertenecientes a la familia de la Labradorita-Andesina y cristales subedrales de Hornblenda, inmersos en una matriz

de microcristales de Feldespato y Vidrio. Algunos de los clastos presentan oxidación de carácter secundario. Existen también fragmentos de cristales de Labradorita, Andesita, Hornblenda que presentan texturas de zonamiento esquelético e incipientes bordes de reacción.

El tamaño de los constituyentes de la fracción gruesa oscila entre 1500 y 2500 micras, mientras que el agregado fino es de 300 a 450 micras.

Los áridos son soportados por una pasta de color pardo oscuro con luz paralela y polarizada. El contacto con los agregados gruesos se da por medio de un borde de reacción.

Existen poros de formas semiesféricas con tamaños promedio de 350 micras restringidos a la pasta, no se observó microfisuramiento importante.

En la figura 4 se observa en la parte superior un fragmento lítico perteneciente a la fracción gruesa exhibiendo un borde de reacción, presenta una ligera oxidación. En la parte central izquierda aparece un cristal cubierto parcialmente por la pasta.

4.6. ESTUDIOS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA.

Los estudios de microscopía electrónica de barrido se realizaron para conocer el carácter del gel que se identificó con el MGF. La prueba se llevó a cabo solo en las barras 1B2 y 2B2. En las figuras 5 a 14 se muestra el aspecto de los productos identificados, se puede decir que todos son productos típicos de la RAS, y concuerdan con los resultados de otros investigadores.

De acuerdo a la propuesta de Larive y Louarn para la clasificación de los productos de la reacción, los resultados de las observaciones son los siguientes:

Productos Amorfos: En las figuras 5, 6, y 7, se presenta un gel abundante donde se observa una sola capa. (Smooth Shaped). En la figura 6 se observa el espesor de la capa del gel, aproximadamente 10 micras, los parches blancos sobre el gel son calcita. En la figura 8 se observa una zona donde se fracturó el agregado, en la parte superior se presenta el gel amorfo. La figura 9 es una ampliación de la parte central inferior de la figura 8, se observa en la parte derecha productos de la reacción llenando algunas grietas.

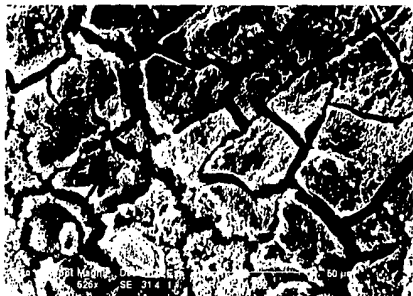


Figura 5



Figura 6

Productos Semi-Organizados: En la figura 10 se observa este tipo de productos, la figura muestra productos poliformes donde se encuentra presente el gel y pequeños cristales de aspecto laminar. En la figura 11 se ve una cavidad rodeada de gel, y en las figuras 12 y 13 se observa el interior de la cavidad donde se aprecian depósitos de productos de la reacción de tipo poliforme.

Productos Cristalizados: En la figura 14 se observan productos cristalizados de forma en roseta de manera abundante.

Figura 7

Figura 8

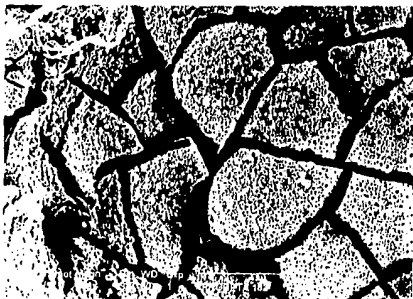




Figura 9

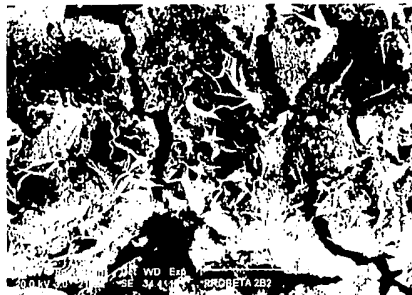


Figura 10

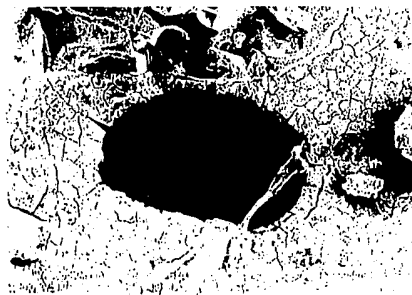


Figura 11
Figura 13

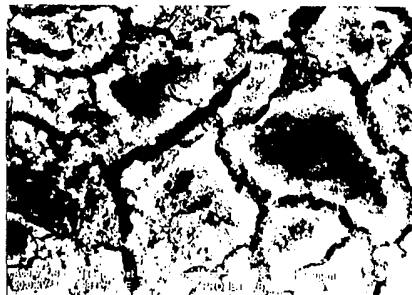


Figura 12
Figura 14



La clasificación anterior no es rígida debido a que los productos de la reacción pueden aparecer de formas y combinaciones distintas, por lo que algunos productos pueden ser susceptibles de entrar en 2 categorías, aquí se hizo un intento por dar una clasificación a las observaciones.

4.6. APLICACION DEL METODO DEL GEL FLUORESCENTE.

4.6.1. Aplicación del MGF a las barras.⁷⁶

Para hacer las observaciones con el MGF, los especímenes se sacaron del cuarto de curado y se partieron a la mitad de forma longitudinal con un disco de diamante, y se lavaron con agua. Después se les aplicó con un atomizador la solución de acetato de uranio y se dejaron reposar

TABLA 8a. Observaciones de las barras con el MGF.

Grupo	Antes de aplicar el MGF	Después de aplicar el MGF
1A1	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	No se distingue fluorescencia, presentes zonas de color verde opaco en el centro de la barra, en las orillas un color más claro; manchas de color blanquecino.
1A2	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	Existe fluorescencia en puntos aislados muy pequeños de 2 mm aprox.; la zona más brillante al centro de la barra, zonas de color verde opaco.
1B1	Partículas rodeadas de un arillo color gris claro; algunos poros se llenan con este material.	Existen partículas entre 1 y 2 mm en varias partes rodeadas por un arillo color amarillo-verdoso fluorescente; zonas con manchas color azul oscuro.
1B2	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	Arillos fluorescentes de diferentes tamaños entre 1 y 5 mm; puntos brillantes de color verde-amarillo; zonas de color verde parduzco y azul
1B3	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	No se distingue fluorescencia, zonas de color verde opaco y azul oscura en toda la barra

durante 10 minutos para que ocurriera la absorción de los iones de uranio en la superficie del gel de sílice -si existiera-, y a continuación se lavaron con agua corriente para remover la solución de uranio no absorbida. Para localizar la posición del uranio absorbido, y así, la posición del gel de sílice, el espécimen se iluminó con una lámpara de luz ultravioleta de onda corta en un cuarto oscuro. Se tomaron fotografías de las observaciones.

La presencia del gel álcali-silíce se indica por la fluorescencia característica del ión de uranio absorbido de color amarillo-verde.

De cada combinación cemento-agregado se tomó una barra, y se les aplicó el proceso descrito anteriormente del MGF. En las tablas 8a y 8b se presenta un reporte de las observaciones y en las figuras 15 a 26 se presentan las fotos de las mismas.

No existe diferencia cuando se humedece la superficie antes de las observaciones con el MGF, que cuando se aplica directamente sin humedecer.

TABLA 8b. Observaciones de las barras con el MGF.

Grupo	Antes de aplicar el MGF	Después de aplicar el MGF
2A1	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	Se distingue fluorescencia en poros de 1 mm, no se observan arillos de reacción; zonas de color verde opaco
2A2	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	No se distingue fluorescencia, manchas verde opaco; al centro de la barra se presenta una zona más brillante.
2A3	Se exhiben puntos blanquecinos con aspecto de cal	Fluorescencia intensa color amarillo-verdosa en los puntos blanquecinos observados, no existen arillos de reacción
2B1	Se observan partículas rodeadas de un arillo blanquecino, los poros se llenan con un material de aspecto de cal.	Una zona al centro de la barra con fluorescencia muy intensa, algunas partículas pequeñas exhiben un anillo fluorescente; se presenta un color azul en la orilla de la barra
2B2	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	Se observa fluorescencia intensa en casi toda la barra, se notan arillos de reacción en partículas de distintos tamaños, fisuras delgadas que unen al agregado, la pasta fluorescede color amarillo intenso.
2B3	No presenta ninguna alteración o signo que indique la existencia de RAS.	No se distingue fluorescencia, se presentan zonas de color verde opaco.

Como se menciona más adelante después de cierto tiempo las sales de uranilo se precipitan y se presentan fluorescencia, se hicieron observaciones en barras de mortero después de 35 días y todas presentaban en la superficie fluorescencia.

Las observaciones fueron realizadas sin ninguna dificultad, dado que el equipo es ligero y de fácil manejo.

4.6.2. Observaciones en campo.

Se llevaron a cabo observaciones con el MGF en campo, para probar la eficiencia del método y la facilidad de manejo del equipo.

Se hicieron observaciones en núcleos de concreto de una estructura, donde se diagnosticó RAS previamente. El diagnóstico positivo de la RAS en la estructura fué reciente.

Se hicieron observaciones en un núcleo extraído de una estructura que presentaba daños y no se había diagnosticado RAS hasta después de 13 años de haber presentado indicios de daños. Los núcleos tienen una edad desde el momento de su extracción aproximada de 17 años y se han mantenido en un cuarto de curado a temperatura y humedad constantes. Se hicieron 2 estudios de petrografía, uno recién extraídos, donde los reportes no indican de RAS; y a los 8 años, donde los reportes sugieren la RAS. Últimamente se confirmó que la estructura presenta daños por RAS, o cuando menos contribuye a los daños presentados hasta la fecha.



Figura 15



Figura 16



Figura 17



Figura 18



Figura 19

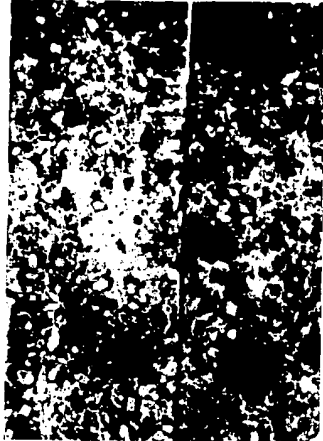


Figura 20



Figura 21



Figura 22



Figura 23



Figura 24



Figura 25



Figura 26

Se fracturó un núcleo de concreto para exponer una superficie fresca, se lavó con agua corriente, se aplicó el acetato de uranilo y esperó 10 minutos. Cuando se aplicó la luz ultravioleta en un cuarto oscuro se observaron puntos de fluorescencia intensa alrededor de las partículas de 2 a 3 mm aproximadamente, no existían arillos de reacción en el agregado grueso. Los resultados de la petrografía indican que el material reactivo está presente en la arena, lo cual concuerda con las observaciones de MGF. No se pueden dar más detalles de la estructura debido al carácter privado de los estudios.

4.7. DISCUSION DE LOS RESULTADOS.

Los resultados de la prueba de expansión acelerada utilizando el cemento tipo I, muestran que el agregado A1, y B3 son inocuos; los otros agregados son reactivos, presentando la mayor expansión promedio las barras del grupo 1A2 con 0.511% y la menor las barras del grupo 1B3 con 0.01% (ver tabla 6).

Efecto de las mezclas con cemento con puzolana. Cuando se elaboran las barras con cemento con puzolana todos los agregados presentan expansiones dentro del límite de los agregados inocuos, menor que 0.20%. Esto sugiere que para los agregados A2, B1 y B2 en particular, utilizar un cemento con puzolana reduce las expansiones provocadas por la RAS. En el caso de los agregados A1 y B3, al utilizar cemento con puzolana se registra un aumento en la expansión, de 0.041% con cemento normal tipo I a 0.069% con cemento con puzolana para A1; de 0.011% a 0.031% para B3 usando cemento con y sin puzolana respectivamente; pero ambos se encuentran aún dentro del límite de agregados inocuos.

Es interesante el comportamiento del agregado 1B3, fué clasificado como potencialmente reactivo de acuerdo al análisis químico de reactividad potencial, y presentó una expansión de 0.011% a los 14 días, inclusive menor que el agregado 1A1 que es un agregado conocido con buen comportamiento en las estructuras durante más de 30 años. Cuando se aplicó el MGF no se detectaron productos que indicaran RAS, tampoco las barras presentaron indicios de RAS. Por la expansión presentada y no identificarse productos de la reacción parece indicar que el método químico determinó erróneamente como potencialmente reactivo a este agregado. Sin embargo, este agregado merece mayor investigación para determinar su carácter real.

Los agregados B1 y B2 fueron clasificados reactivos por la prueba de expansión, y como agregados perjudiciales de acuerdo a la prueba química de reactividad potencial. En los resultados de la petrografía de las barras elaboradas con estos agregados se encontraron bordes de reacción

y materiales clasificados potencialmente reactivos, se piensa que la andesita es el material reactivo por los tamaños del agregado observados aquí con el de las zonas observadas con el MGF (1B2, 2B2, 2B1, ver inciso). La microscopía electrónica de las barras 1B2 y 2B2 en zonas previamente identificadas con el MGF se observan los típicos productos de reacción reportados por Larive y Louam, Diamond, Bérubé; por lo tanto, se concluye que las zonas detectadas por el MGF son positivamente productos de la RAS.

Las barras de los grupos 2A1, 2A3, 2B1 y 2B2 aunque no mostraron expansión consideradas perjudiciales, por el efecto de la puzolana para los agregados A3, B1 y B2, presentaron zonas con fluorescencia en la pasta y anillos de reacción solo el agregado B2; lo anterior sugiere que con la puzolana la reacción se presenta en la pasta y no en el agregado.

Observando los grupos que presentaron el gel álcali-sílice, como 1B1, 1B2, 2B1 y 2B2, es claro que el volumen de gel presente en la barra (cualquiera sea la causa) no está relacionado con la magnitud de la expansión presentada. La figura 18 muestra la zonas detectadas con gel en la barra 1B1 con el MGF, si hacemos una estimación se podría decir que el 4% de la cara presenta fluorescencia, este grupo presentó una expansión de 0.40% a los 16 días. Ahora observemos la figura 24 de la barra 2B2, la cantidad de productos de la reacción se encuentra en el 25% de la cara de la barra y la expansión de este grupo fué de 0.04%, es decir 10 veces menor que la del grupo 1B1, pero aquí se detecta una mayor cantidad del gel. En este mismo orden de ideas se puede observar la barra del grupo 1A1 y 1B3 en las figuras 16 y 20, las expansiones presentadas para estos grupos son 0.06 y 0.03% respectivamente, con el aumento en los productos de la reacción. Por lo tanto, el MGF no es un instrumento útil para predecir la expansión de estos agregados en base a la cantidad de gel visualizado. Esta situación se detectó en las observaciones con el resto de las barras, es decir, no existe relación entre la magnitud de la expansión y la cantidad de gel presente.

CONCLUSIONES

Existen 3 formas de la reacción, según los agregados que intervienen, y se denominan: Alcali-Sílice, Alcali-Silicato, y Alcali-Carbonato. El tema de este trabajo se refiere a la identificación de la primera, que es la que ocurre con mayor frecuencia.

La reactividad álcali-sílice (RAS) es una reacción físico-química que se presenta en el concreto entre los álcalis del cemento y ciertas formas de sílice de los agregados, reacción que con el tiempo y presentándose las cantidades apropiadas de estos elementos con la presencia de humedad -"condición pésima"-, puede llegar a deteriorar el concreto de manera severa y causar la pérdida de la estructura.

Es avanzado el conocimiento del fenómeno en cuanto a la influencia de los diferentes parámetros y mecanismo de la reacción -este no se encuentra bien dilucidado actualmente-, los avances más significativos son en el aspecto de pruebas y ensayos para la identificación de la RAS. En cuanto a normatividad en México se requiere una mayor investigación en alternativas para usar materiales potencialmente reactivos en caso de ser necesario su uso en las estructuras.

En México existen factores de alto riesgo para la existencia de la reacción, como son: agregados con sílice amorfa, microcristalina y criptocristalinas, cementos altos en álcalis, y presencia de humedad en las estructuras, pero no se tienen casos oficialmente reconocidos o publicados como afectados por la reacción. Sin embargo, el autor puede citar el conocimiento de diversas estructuras que se han visto afectadas por la reacción con edades entre 7 y 30 años, tales como puentes, un grupo de silos, y presas, las cuales se ubican dentro de la zona catalogada como potencial fuertemente reactivo, según la delimitación de regiones con rocas silíceas potencialmente reactivas según estudios de la CFE. El diagnóstico de los casos citados fué efectuado por la compañía americana CTL (Control Technology Laboratories) y por el IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto). Debido al carácter privado de los estudios se omite mayor información.

En cuanto a los métodos de identificación de la RAS, ninguno ofrece una seguridad al cien por ciento de detectar los materiales deletéreos, la reacción o los productos de esta, siempre existen limitaciones para cada prueba; tampoco se puede asegurar con una prueba que el agregado que se esté probando tenga un comportamiento nocivo bajo las condiciones reales de uso, y medio ambiente al cual estará expuesto; la decisión final para determinar un diagnóstico definitivo debe realizarla un especialista evaluando toda la información disponible y ponderando la importancia de la estructura. En ocasiones al aplicar varios métodos los resultados ofrecen controversias.

La identificación de la reactividad álcali-sílice no es fácil. La presencia de fisuras en forma de mapa (mapeo), exudaciones blancas en la superficie del elemento y expansiones anormales en algunas partes de la estructura, no son evidencia concluyente por si solas para diagnosticar la RAS en una estructura; solo la presencia del gel álcali-sílice es evidencia suficiente para diagnosticar en la existencia de la RAS. Solo la petrografía y observación en microscopio electrónico de corazones de concreto extraídos de la estructura son medios confiables para identificar los productos de la reacción. Sin embargo, requieren de personal calificado -un petrógrafo con experiencia-, un equipo de laboratorio sofisticado, se deben analizar un gran número de muestras para obtener resultados estadísticamente significativos, consumen tiempo, y tienen un costo considerable.

El Método del Gel Fluorescente (MGF) es un medio sencillo, rápido y preciso de identificación de los productos de la reacción álcali-sílice. El gel es identificado sumergiéndolo o añadiéndole iones de uranio, que bajo luz ultravioleta presenta un color fluorescente. Los productos de la reacción se visualizan por un intercambio de cationes de uranio por cationes alcalinos que se encuentran absorbidos previamente por el gel de sílice, lo anterior se debe a la afinidad por cationes metálicos del gel de sílice, la cual tiene prioridad por el uranio antes de los cationes alcalinos. La solución de uranio que se utiliza en el método no reacciona o absorbe ningún otro material presente en el concreto, ni los productos de la hidratación del cemento.

La presencia del gel de sílice es fácil de identificar por la fluorescencia característica del ión de uranio absorbido amarillo-verdosa, mientras que el uranio en solución no es fluorescente, las sales de uranio no disueltas fluorescen con un color verde opaco. El tiempo que se requiere para que la absorción del ión de uranio se lleve a cabo es rápida y se completa en menos de 5 minutos.

Se logró reproducir el gel álcali-sílice en barras de mortero con las combinaciones cemento-agregado utilizados. El método canadiense CSA CAN3-A23.2-XXC, (Standard Test Method for Accelerated Detention of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bars Due to Alkali-Silica Reaction) cumplió con el objetivo; el método consiste en sumergir los especímenes en una solución

de NaOH a 80 °C durante 14 días. El método acelerado es más sencillo de realizar que el método ASTM C-227, además de las ventajas de la duración de la prueba; solo la temperatura de la solución es un inconveniente ya que hace incómodo manejar las probetas.

La precipitación de la solución de uranio conforme se seca el espécimen también produce una fluorescencia que puede ser equivocadamente identificada como presencia del gel silicato. Esto se presenta después de una hora de secado, y permanece mucho tiempo, por lo que una vez realizada la prueba no es posible reutilizar la superficie expuesta para posteriores pruebas. Por lo que se tiene que exponer una parte distinta del concreto para hacer posteriores evaluaciones. En elementos de concreto expuestos a los cloruros, al aplicar el MGF se presenta fluorescencia en ocasiones, la cual puede ser erróneamente identificada como reacción álcali-sílice. Se debe tener presente lo anterior especialmente en zonas donde se utilicen sales para el deshielo.

Las pruebas de petrografía y microscopía electrónica sobre los especímenes donde se identificó la RAS con el Método del Gel Fluorescente (MGF) confirmaron la existencia y localización de los productos de la reacción.

El gel producto de la reacción álcali-sílice, en los especímenes que la presentaron, absorbieron el ión uranio y se visualizaron como verde-amarillo fluorescente. El método es confiable para identificar el producto de la reacción álcali-sílice (gel) aún cuando se presenta en pequeñas cantidades. Provee un método eficaz para el seguimiento de la reacción en estructuras que estén afectadas por la reacción álcali-sílice.

No existe relación entre la cuantificación del gel y la expansión presentada en los especímenes. Por lo tanto, el método solo sirve para conocer la localización del gel y cuantificar los productos de la reacción.

Es un método de identificación rápido con resultados instantáneos. Solo se requiere el tiempo para revelar la película fotográfica.

El equipo necesario es de bajo costo, ligero, de fácil manejo, y puede trasladarse con facilidad, lo cual simplifica hacer observaciones en campo. Las observaciones estarán limitadas a la accesibilidad del elemento que se requiera evaluar.

No obstante la sencillez del método, la solución de acetato de uranilo debe emplearse con precaución, así como la luz ultravioleta de la lámpara puede dañar la vista. Personal capacitado con equipo preventivo adecuado debe realizar la prueba.

Existen algunos productos secundarios que no son identificados con el método, de los cuales no se ha podido definir claramente su carácter y composición.

Un inconveniente en cuanto a la aplicación del método es la necesidad de un área oscura -por lo menos parcialmente- para realizar las observaciones.

Se requiere de una película fotográfica de alta sensibilidad debido a la poca iluminación que se logra con la lámpara. Posiblemente aumentando la intensidad de la lámpara -sin cambiar la longitud de onda- se puede reducir la sensibilidad de la película y lograr fotos con mayor definición.

Por último una nota precautoria necesaria para la utilización de este método, se insiste en el uso de equipo adecuado de protección en todo momento -guantes y lentes para protección de los rayos de luz ultravioleta-, así mismo una práctica adecuada; ya que las sustancias y equipo son de empleo delicado y pueden causar daños graves al organismo. En el apéndice se presentan los riesgos y primeros auxilios necesarios en caso ocurrir un accidente.

BIBLIOGRAFIA.

1. Al-Asali, M.M., Malhotra, V.M., and J.A. Soles, **Performance of Various Test Methods for Assessing the Potential Alkali Reactivity of some Canadian Aggregates**, ACI Materials Journal, V. 88, No.6, November-December 1991.
2. M.A. Bérubé, B. Fournier, **Application of the NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Silicious-Carbonate Aggregates Produced in the St. Lawrence Lowlands (Quebec, CANADA), Part 1: Influence of Various Parameters on the Test Results**, Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp 853-862, 1991.
3. M.A. Bérubé, B. Fournier, P. Mongeau, N. Dupont, C. Quellet and J. Frenette, **Effectiveness of the Accelerated Mortar Bar Methods, ASTM C-9 Proposal P-214 or NBRI, for Assessing Potential AAR in Quebec (CANADA)**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 92-101, 1992.
4. M.A. Bérubé, B. Fournier, **Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete**, Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, UANL, Nuevo León, México, pp. 55-78, 1993.
5. M.A. Bérubé, B. Fournier, **Applications of a Modified Go! Pat Test to Determine the Potential Alkali-Silica Reactivity of Carbonate Aggregates**, Cement and Concrete Research, Vol 15, p. 49-73, 1993.
6. M.A. Bérubé, B. Fournier, **Canadian Experience with Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete**, Cement and Concrete Research, Vol 15, pp. 27-47, 1993.
7. M.A. Bérubé, B. Fournier, **Accelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity**, CANMET Advances in Concrete Technology, Editor V.M. Malhotra, pp. 583-627, 1992.
8. M. Brouxel, **The Alkali-Aggregate Reaction Rim: Na₂O, SiO₂, K₂O and CaO Chemical Distribution**, Cement and Concrete Research, Vol 17, pp. 309-320, 1993.
9. S. Chatterji, N. Thaulow, A.D. Jensen, **Studies of Alkali-Silica Reaction, Part 3, Mechanism by which NaCl and Ca(OH)₂ Affect the Reaction**, Cement and Concrete Research, Vol 16, 2, pp. 246-254, 1986.
10. S. Chatterji, N. Thaulow, A.D. Jensen, **Studies of Alkali-Silica Reaction, Part 4, Effect of Different Alkali Salt Solutions on Expansion**, Cement and Concrete Research, Vol 17, pp. 777-783, 1987.
11. S. Chatterji, N. Thaulow, A.D. Jensen, **Studies of Alkali-Silica Reaction, Part 5, Verification of a newly Proposed Reaction Mechanism**, Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 177-183, 1989.
12. S. Chatterji, N. Thaulow, A.D. Jensen, **Studies of Alkali-Silica Reaction, Part 6, Practical Implications of a Proposed Reaction Mechanism**, Cement and Concrete Research, Vol 18, pp. 363-368, 1988.
13. S. Chatterji, **A Discussion on the Paper "Mechanism of Alkali-Silica Reaction and the Significance of calcium Hydroxide**, Cement and Concrete Research, Vol 22, pp.190-192, 1992.
14. H. Chen, **Investigations of Supplementary Cementing Materials for Reducing Alkali-Aggregate Reactions**, Cement and Concrete Research, Vol 15, p. 75-85, 1993.
15. J.L. Cottier Cavedes, **Efectos de la Reacción Alcali-Agregado en el Concreto**, Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, UANL, Nuevo León, México, pp.15-30, 1993.
16. A. Criaud, C. Vernet and C. Defossé, **A Rapid Test for Detecting the Reactivity of Aggregates: Microbar Method**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 201-209, 1992.

17. Ari Danay, **Structural Mechanics Methodology in Diagnosing and Assessing Long-Term Effects of Alkali-Aggregate Reactivity in Reinforced Concrete Structures**, ACI Materials Journal, Vol. 91, No. 1, January-February 1994.
18. L. DeCeukelaere, **The Determination of the Most Common Crystalline Alkali-Silica Reaction Product**, Materials and Structures, Vol 24, pp. 169-171, 1991.
19. D.P. DeMerchant, **CANMET Research on Alkali-Aggregate Reactivity in New Brunswick**, Cement and Concrete Research, Vol 15, pp. 85-100, 1993.
20. Vance H. Dodson, **Alkalies in Concrete**, American Society for Testing and Materials STP-930. Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates.
21. D.K. Doran and J.F.A. Moore, **Appraisal of the Structural Effects of Alkali-Silica Reaction**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 677-682, 1989.
22. Dent Glasser and N. Kataoka, **On the Role of Calcium in the Alkali-Aggregate Reaction**, Cement and Concrete Research, Vol 12, pp. 321-332, 1982.
23. F.X. Deloye and L. Divet, **The Alkali Aggregate Reaction Quantitative Aspects**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 251, 1992.
24. Sidney Diamond, **Alkali-Silica Reaction - Another Look at Mechanism**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 83, 1989.
25. Jhon Figg, **An Historical Perspective on One-and-Half Decades of Alkali-Aggregates Research**, Proceedings, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 9, 1989.
26. J.C. Flanagan, **Alkali-Aggregate Reaction: Practical, Preventive and Remedial Measures**, Proceedings 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/17, 1981.
27. Otto Fritz, **Concreto Reforzado**, 2a. Edición, México, pp. 1-4, 1965.
28. J. E. Gillot, **Petrography of Concrete Cores from New Brunswick, Relating to the Durability Problem**, Cement and Concrete Research, Vol 15, pp. 101-104, 1993.
29. P.E. Grattan-Bellow, **Test Methods and Criteria for Evaluating the Potential of Aggregates**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 279, 1989.
30. P.E. Grattan-Bellow, **A Review of Test Methods for Alkali-Expansivity of Concrete Aggregates**, Proceedings 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/9, 1981.
31. J.S. Guedon, A. LE Roux, F. Martineau, **Visualization of Alkali-Reaction Products by Fluorescence. Development of the Method for the Survey of Structures**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 395, 1992.
32. W.A. Gutteridge and D. W. Hobbs, **Some Chemical and Physical Properties of Beltane Opal Rock and Its Gelatinous Alkali-Silica Reaction Product**, Cement and Concrete Research, Vol 10, pp. 183-193, 1980.
33. D.W. Hobbs and W. A. Gutteridge, **Particle Size of Aggregate and Its Influence Upon the Expansion Caused by the Alkali-Silica Reaction**, Magazine of Concrete Research, Vol 31, No. 109, pp. 235-242, December 1979.
34. D.W. Hobbs, **Expansion of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction: An Explanation**, Magazine of Concrete Research, Vol. 30, No. 105, December 1978.
35. R.D. Hooton, **Interlaboratory Study of the NBRI Rapid Test Method and CSA Standardization Status**, Canadian Developments in Testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregates Reactivity; Proceedings of a workshop held on March 19, 1990 at the American Concrete Institute Convention, Toronto, March, 1990.
36. R.D. Hooton and C.A. Rogers, **Evaluation of Rapid Test Methods for Detecting Alkali-Reactive Aggregates**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 439-444, 1989.
37. R.D. Hooton and C.A. Rogers, **Development of the NBRI Rapid Mortar Bar Test Leading to its Use in North America**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 461-467, 1992.

38. R.D. Hooton and C.A. Rogers, **Comparison Between Laboratory and Field Expansion of Alkali-Carbonate Reactive Concrete**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 877-884, 1992.
39. Peter P. Hudec and Nana K. Banahene, **Chemical Treatments and Additives for Controlling Alkali-Reactivity**, Cement and Concrete Research, Vol 15, pp. 21-26, 1993.
40. G.M. Idom Consult A/S, **Alkali-Silica Reactions in Retrospect and Prospect**, Proceedings, 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, p. 1, 1989.
41. D.M. Kerrick, R.D. Hooton, **ASR of Concrete Aggregate Quarried from a Fault Zone: Results and Petrographic Interpretation of Accelerated Mortar Bar Tests**, Cement and Concrete Research, Vol 22, pp. 949-960, 1993.
42. S.H. Kosmatka and A. E. Fiorato, **Detecting and Avoiding Alkali-Aggregate Reactivity**, Revista Concrete Technology Total, Vol 12, Number 3, Nov. 1991.
43. P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, **Concrete (Structure, Properties and Materials)**, 2nd Edition, 1993. Prentice Hall, pp. 154-159.
44. C. Larive, N. Louam, **Diagnosis of Alkali-Aggregate Reaction and Sulphate Reaction in French Structures**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 587-598, 1992.
45. K.R. Lauer, **Classification of Concrete Damage Caused by Chemical Attack**, Materials and Structures Vol. 23, pp. 223-229, 1990.
46. B. Mather, **How to Obtain Durable Concrete**, Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, UANL, Nuevo León, México, pp. 1-12, 1993.
47. M. Mena Ferrer, **Reacción Alkali-Silice en el Concreto: Causas, Efectos y Medios de Prevención**, Revista IMCYC, Vol 21, 148, 17-31, 1983.
48. Deng Min, Tang Mingshu, **Measures to Inhibit Alkali-Dolomite Reaction**, Cement and Concrete Research, Vol 23, pp. 1115-1120, 1993.
49. Tang Mingshu, **Classification of Alkali-Aggregate Reaction**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 648-659, 1992.
50. Tang Mingshu, Deng Min, Lan Xianghi, **Studies on Alkali-Carbonate Reaction**, ACI Materials Journal, V. 91, No. 1, January-February 1994.
51. L. J. Murdock, K.M. Brook, J.D. Dewar, **Concrete (Materials & Practice)**, 5th Edition, 1991. Edward Arnold pp. 46-48.
52. R. Narayan Swamy, M.M. Al-Asali, **Expansion of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction**, ACI Materials Journal, V. 85, January-February 1988.
53. R. Narayan Swamy, M.M. Al-Asali, **Engineering Properties of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction**, ACI Materials Journal, V. 85, September-October 1988.
54. Kumar Natesaiver and Kenneth C. Hover, **Some Field Studies of the In Situ Method for Identification of Alkali-Silica Reaction Products**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 555, 1989.
55. Kumar Natesaiver and Kenneth C. Hover, **In Situ Identification of Alkali-Silica Reaction Products in Concrete**, Cement and Concrete Research, Vol 18, pp. 455-463, 1988.
56. Kumar Natesaiver and Kenneth C. Hover, **Further Study of an In Situ Identification Method for Alkali-Silica Reaction Products in Concrete**, Cement and Concrete Research, Vol 19, pp. 770-778, 1989.
57. Kumar Natesaiver, **Some Applications of the Gel Fluorescence Test for Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, Cement and Concrete Research, Vol 15, pp. 3-6, 1993.
58. Kumar Natesaiver, D. Stark, K.C. Hover, **Gel Fluorescence Reveals Reaction Product Traces**, Concrete International, V. 13, No. 1 Jan 1991, pp. 25-28.
59. Adam Neville, **Concrete Research on a Micro -and a Macro- Scale**, Cement and Concrete Research, Vol 22, pp. 1067-1076, 1982.

60. A.M. Neville, J.J. Brooks, **Concrete Technology**, Longman Scientific & Technical, Jhon Wiley & Son Inc. 1987, pp. 273-275.
61. A. Nielsen, F. Gottfredsen, F. Thøgersen, **Recycling of Concrete With Alkali-Reactive Aggregate**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 706-711, 1992.
62. S. Nishibayashi, K. Yamura and K. Sakata, **Evaluation of Cracking of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 759, 1989.
63. P.J. Nixon and I. Sims, **Alkali-Aggregate Reaction - Accelerated Tests**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 731-738, 1992.
64. R.E. Oberholster and G. Davies, **An Accelerated Method for Testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates**, Cement and Concrete Research, Vol 16, pp. 181-189, 1986.
65. R.E. Oberholster and G. Davies, **Alkali Silica Reaction Products and their Development**, Cement and Concrete Research, Vol 18, 4, pp. 621-635, 1988.
66. Dennis Palmer, **Aspects of the Diagnosis of Alkali-Silica Reaction**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 741-746, 1989.
67. T.C. Powers and H.H. Steinar, **An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction, Part 1: The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion**, Journal of the American Concrete Institute, April 1955, pp. 497-516.
68. T.C. Powers and H.H. Steinar, **An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction, Part 2: A Hypothesis Concerning Safe and Unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete**, Journal of the American Concrete Institute, April 1955, pp. 785-812.
69. K. Pettifer and P.J. Nixon, **Alkali Metal Sulphate - a Factor Common to Both Alkali Aggregate Reaction and Sulphate Attack on Concrete**, Cement and Concrete Research, Vol 10, pp. 173-181, 1980.
70. A.B. Poole, **Alkali Silica Reactivity Mechanism of Gel Formation and Expansion**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 782-789, 1992.
71. A.B. Poole, A. McLachlan and D.J. Ellis, **A Simple Staining Technique for the Identification of Alkali-Silica Gel in Concrete**, Cement and Concrete Research, Vol 18, pp. 116-120, 1988.
72. W. Prince and R. Perami, **Mechanism of the Alkali-Dolomite Reaction**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 799-805, 1992.
73. Rasheeduzzafar, **Influence of Cement Composition on Concrete Durability**, ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 6, November-December 1992.
74. Micheline Regourd-Moranville, **Products of Reaction and Petrographic Examination**, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 445-456, 1989.
75. C.A. Rogers, **Alkali-Aggregate Reactivity in Canada**, Cement and Concrete Research, Vol 15, pp. 13-19, 1993.
76. H. Saldívar Moguel, **Identificación in Situ de la Reactividad Alcali-Silicea con el Método del Gel Fluorescente. Estudio de Aplicación**, Memorias del Seminario Nacional sobre la Enseñanza del Concreto, Acapulco, Gro. México, Mayo 1994.
77. G. Seraj, C.L. Page, D.M. Thompson, **Electrochemical Induction of Alkali-Silica Reaction in Concrete**, Materials and Structures, Vol. 24, pp. 359-361, 1991.
78. A. Shavan, **Alkali Reactivity of Deformed Granitic Rocks: A Case Study**, Cement and Concrete Research, Vol 23, pp. 1229-1236, 1993.
79. Ian Sims, **The Application and Reliability of Standard Testing Procedures For Potential Alkali-Reactivity**, Proceedings 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, S252/13, 1981.
80. D. Sorrentino, J.Y. Clément, J.M. Golberg, **A New Approach to Characterize the Chemical Reactivity of the Aggregates**, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 1009-1016, 1992.
81. Stanton, Thomas E., **Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate**, Proceedings, American Society of Civil Engineers, Dec. 1940, pp. 1781-1811.

82. D.C. Stark, Alkali-Silica Reactivity: Some Reconsiderations, Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD076.01T, 4 p, 1981.
83. Strategic Highway Research Program SHRP, Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity In Highway Structures, SHRP-C/FR-91-101, National Research Council, 1991.
84. L. Struble and M. Brockman, Standard Aggregate Materials for Alkali-Silica Reactions Studies, Proceedings 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 433, 1989.
85. T. Taguchi, S. Chatterji and M. Kawamura, A Comparison of Different Methods of Detection of Alkali-Silica Reactivity of Aggregates, Cement and Concrete Research, Vol 23, pp. 55-58, 1993.
86. H. Tamura, T. Takahashi and M. Ohashi, Minimizing of Alkali Aggregate Reaction in Concrete, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 1035, 1992.
87. Dante J.E. Veronelli, Durabilidad de los Hormigones, Conferencia pronunciada en el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid, Abril 20, 1978; Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, n 352, Madrid, Septiembre 1978.
88. H.E. Vivian, The Mechanism of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 1085-1089, 1992.
89. H. Vvang and J.E. Gillot, Mechanism of Alkali-Silica Reaction and the significance of Calcium Hidroxiide, Cement and Concrete Research, Vol 21, pp. 647-654, 1991.
90. Jonathan G.M. Wood, David K. Doran, Revision of the Institution of Structural Engineers Report. Structural Effects of Alkali Silica Reaction-, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp.1107-1120, 1992.
91. ACI Committee 201, Proposed Revision of: Guide to Durable Concrete, ACI Materials Journal, V. 88, No.5, September-October 1991.
92. BCA, The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction, Report of a working party.
93. N. Thalow and M. K. Geiker, Determination of the Residual Reactivity of Alkali-Silica Reaction in Concrete, Proceedings 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 1050-1058, 1992.
94. Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana, NOMC-111-1992, Agregados para Concreto, Especificaciones, SECOFI, Dirección General de Normas, Jul. 1986.
95. Norma Oficial Mexicana, NOM C-180-1986, Determinación de la Reactividad Potencial de los Agregados con los Alcalis del Cemento por Medio de Barras de Mortero, SECOFI, Dirección General de Normas, Jul. 1986.
96. Norma Oficial Mexicana, NOM C-271-1984, Determinación de la Reactividad Potencial de los Agregados con los Alcalis del Cemento (Método Químico), SECOFI, Dirección General de Normas, En. 1984.
97. Norma Oficial Mexicana, NOM C-265-1983, Agregados para Concreto, Examen Petrográfico, SECOFI, Dirección General de Normas, 1983.
98. Norma Oficial Mexicana, NOM C-272-1979, Reactividad Potencial de Rocas de Carbonatos en Agregados para Concreto con los Alcalis (Método del Cilindro de Roca), SECOFI, Dirección General de Normas, 1979.
99. Norma Oficial Mexicana, NOM C-282-1983, Cambio de Volumen de Combinaciones Cemento-Agregado, Metodo de Prueba, SECOFI, Dirección General de Normas, 1983.
100. Norma Oficial Mexicana, NOM C-298-1980, Determinación de la Efectividad para Prevenir una Expansión Excesiva del Concreto Debida a la Reacción Alcali-Agregado, SECOFI, Dirección General de Normas, 1980.
101. Norma Oficial Mexicana, NOM C-305-1980, Agregados para concreto, Descripción de sus Componentes Minerales Naturales, SECOFI, Dirección General de Normas, 1980.
102. ASTM Standard, C 227 - 90, Manual of Aggregate and Concrete Testing, 1992 Book of Standard, Vol 04.02.
103. ASTM Standard, C 227 - 90, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), 1992 Book of Standard, Vol 04.02.

104. ASTM Standard, C99 Proposed Test Method for Accelerated Detection of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bars Due Alkali-Silica Reaction, 1992 Book of Standard, Vol 04.02.
105. ASTM Standard, C 441 - 89, Standard Test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction, 1992 Book of Standard, Vol 04.02.
106. ASTM Standard, C 289 - 87, Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method), 1992 Book of Standard, Vol 04.02.
107. ASTM Standard, C 295 - 90, Standard Guide For Petrographic Examination of Aggregates for Concrete, 1992 Book of Standard, Vol 04.02.
108. ASTM Standard, C 33 - 90, Standard Specification for Concrete Aggregates, 1992 Book of Standard, Vol 04.02.
109. ASTM Standard, C 490 - 89, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste Mortars, 1992 Book of Standard, Vol 04.01.
110. ASTM Standard, C 150 - 89, Standard Specification for Portland Cement, 1992 Book of Standard, Vol 04.02.

APENDICE.

INFORMACION PREVENTIVA.

Inhalación: La inhalación de las sales solubles de uranio causan daño moderado. Se pueden presentar ataques de tos y dificultad para respirar; si existe una exposición prolongada causa daños al hígado y riñones.

Contacto con la piel: Si hay un contacto prolongado con la piel y la solución de uranio provoca irritación y dolor.

Contacto con los ojos: Los tejidos del ojo absorben los compuestos de la solución de uranio, no se conocen bien sus consecuencias, pero se presenta irritación y dolor.

Exposición severa: Los órganos más afectados son el hígado y riñones, graves daños pueden presentarse, como tumores por radioactividad.

Personas con Proclives. Personas proclives a desórdenes en la piel, visuales o de funcionamiento de riñón o hígado son más susceptibles a los efectos de las sustancias.

PRIMEROS AUXILIOS.

Inhalación: Lleve a la persona a un lugar con aire fresco. Si existe dificultad para respirar consiga atención médica de inmediato.

Ingestión: Si se traga la solución, provoque vómito inmediatamente, dándole a la persona 2 vasos de agua o leche, o coloque el dedo en su garganta. Llame al médico de inmediato. Si existe estado de inconsciencia no de a ingerir nada a la persona.

Piel: Retire toda la ropa contaminada. Lave con agua y jabón la piel durante 15 minutos. si la irritación y el dolor persiste, consiga atención médica de inmediato.

Ojos: Lave los ojos con agua corriente durante 15 minutos incluyendo debajo de los párpados superior e inferior. Consiga atención médica de inmediato.