



110
ZEF

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**'REACCION ALCALI-AGREGADO ENTRE EL CEMENTO
Y LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION
EN EL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO'**

T E S I S
PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A:
HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN

**FACULTAD DE
INGENIERIA**



U N A M

MEXICO, D.F.

JULIO 1995

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

110
ZED

FACULTAD DE INGENIERIA

'REACCION ALCALI-AGREGADO ENTRE EL CEMENTO
Y LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION
EN EL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO'

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN

FACULTAD DE
INGENIERIA



MEXICO, D.F.

JULIO 1995

FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-010/94

Señor
HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.I. CARLOS MENDOZA ESCOBEDO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"REACCION ALCALI-AGREGADO ENTRE EL CEMENTO Y LOS AGREGADOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION EN EL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO"

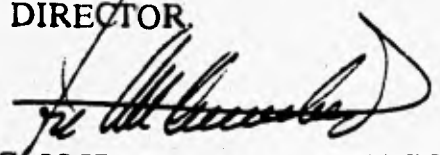
INTRODUCCION

- I . ANTECEDENTES**
- II . CEMENTOS Y AGREGADOS UTILIZADOS EN EL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO**
- III. DETERMINACION DE AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS**
- IV. ANALISIS DE RESULTADOS**
- V . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 1o. de febrero de 1994.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl1

A mis padres:

CARMEN ROMAN MARTINEZ Y

JESUS MONTAÑO ORTIZ,

*de quienes he recibido todo, ayudando con ello
a que pudiera alcanzar todos mis objetivos.*

A mi hermana:

ARACELI MONTAÑO ROMAN,

cómplice en travesuras y secretos.

A mis abuelos

ELEAZAR MARTINEZ LAGUNAS,

SILVINA ORTIZ RAMOS,

RAFAEL MONTAÑO YBARRA,

CAMERINO ROMAN COVARRUBIAS

Y todos sus hijos y nietos:

*en quienes he visto un ejemplo de
honestidad, trabajo y cariño.*

A MARICELA E. ALONSO QUIROZ,

Compañera con la que he compartido

*gran parte de mi vida; que me ha entregado
amor, comprensión y tiempo, e impulsora
en momentos muy difíciles.*

***Al pueblo de México, que me ha dado
la oportunidad de ingresar al reducido
grupo de personas que pueden estudiar.
Estoy seguro que con su lucha
(nuestra lucha) algún día en ese
grupo estarán todos sus integrantes.***

A mis profesores y compañeros...

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a todas las personas e instituciones que colaboraron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo. En especial a:

- Instituto de Ingeniería de la UNAM, uno de los patrocinadores del estudio. Al M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, Subdirector de esta institución, quien sugirió y dirigió esta tesis; al Sr. Francisco Reyes Morán, laboratorista, colaborador en el trabajo experimental; al M.I. Carlos Aire Untiveros, responsable del Laboratorio de Materiales de la misma institución y al Ing. Alberto Fuentes colaborador en el proyecto.

- Laboratorios Raúl J. Marsal de Comisión Federal de Electricidad donde se desarrolló parte del trabajo experimental; a la M.C. Rosa Elba Rodríguez Camacho, quien colaboró en la realización de los métodos experimentales y revisó el contenido de este trabajo; al M.I. Emilio Zamudio Cíntora por el apoyo brindado y al Arq. Guillermo Martínez Alamo y Quim. Irma L. Velázquez Flores por su colaboración en la captura de los resultados.

-M.I. Roberto Uribe Afif, quien realizó el estudio petrográfico de los agregados utilizados en el estudio y revisó la impresión que se presenta.

-Ing. Manuel Mena Ferrer, quien fue asesor del proyecto que dio origen a este trabajo.

**" REACCION ALCALI-AGREGADO ENTRE
LOS CEMENTOS Y LOS AGREGADOS
UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION EN
EL AREA METROPOLITANA DE LA
CIUDAD DE MEXICO "**

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION	1
I. ANTECEDENTES	3
A. Marco histórico.....	3
B. Definición de la reacción.....	5
1. Reacción álcali-sílice y álcali-silicato.....	16
2. Reacción álcali-carbonato.....	25
II. CEMENTOS Y AGREGADOS UTILIZADOS EN EL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO	33
A. Agregados.....	33
1. Ubicación de bancos.....	34
2. Caracterización física.....	36
B. Cementos.....	37
1. Tipos disponibles.....	39
2. Caracterización química.....	40
III. DETERMINACION DE AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS	43
A. Método de prueba ASTM C 295. Examen petrográfico.....	44
B. Método de prueba ASTM C 289. Método químico.....	48
1. Material y equipo.....	48
2. Procedimiento.....	50
3. Resultados.....	53
C. Método de prueba CSA CAN3-A23.2XXC. Método canadiense.....	63
1. Material y equipo.....	63
2. Procedimiento.....	65
3. Resultados.....	69
D. Método de prueba ASTM C 227. Método de barras de mortero.....	80
1. Material y equipo.....	80
2. Procedimiento.....	81
3. Resultados.....	83
IV. ANALISIS DE RESULTADOS	88
A. Resultados por método.....	88
B. Resultados generales.....	90
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	96

INTRODUCCION

Desde la antigüedad, una de las razones por las que el hombre ha tratado de transformar los recursos naturales, es la satisfacción de sus necesidades básicas; y es con ese fin que al principio la mezcla de piedras gruesas y finas con un material cementante y agua, dieron origen a uno de los materiales de construcción más utilizados en la actualidad: el concreto.

En nuestros días la utilización del concreto es muy amplia. Se le utiliza tanto en obras de gran magnitud (puentes, presas, pavimentos, edificios, etc.) como en obras pequeñas (casas habitación, guarniciones, tanques, etc.). Desafortunadamente el control de la calidad en la producción del concreto que se utiliza en las mismas no se lleva a cabo siempre, y sólo algunas propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido, así como otras de cada uno de sus componentes son supervisadas con frecuencia sobre todo en obras de gran magnitud.

Las propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido, así como aquellas que influyen en estado fresco, reciben especial atención, pues se les asocia con la seguridad estructural de las obras y muchas veces algunos otros aspectos que influyen en la durabilidad del material son pasados por alto. Tal es el caso de la compatibilidad de los componentes del concreto.

La reacción álcali-agregado (RAA) es un problema de incompatibilidad de ciertas fases minerales existentes en los agregados con los álcalis de la solución de poro del concreto, provenientes principalmente del cemento. Los tipos de RAA identificados hasta ahora son: reacción álcali-silice, reacción álcali-carbonato y reacción álcali-silicato. Los mecanismos deletéreos de las tres son diferentes y están relacionados con los tipos de minerales que componen a los agregados, pero todas ellas tienen como denominador común, que al presentarse generan fuerzas expansivas en el interior del concreto que son capaces de agrietarlo por completo al sobrepasar su resistencia a tensión.

Obviamente con el agrietamiento total del concreto, sus propiedades mecánicas se ven disminuidas, y más aún, los agentes externos encuentra un excelente canal de comunicación hacia su interior, creándose de esta manera condiciones para la generación de nuevos problemas que contribuyen a disminuir en gran medida su durabilidad.

Los primeros casos de reactividad álcali-agregado se remontan a la primera mitad de este siglo; desde entonces, el problema sigue presentándose con frecuencia en diferentes países, convirtiéndose en uno de los 16 casos más comunes que afectan la durabilidad del concreto. Su incidencia ha originado que numerosos investigadores en todo el mundo desarrollen técnicas que contribuyan a explicar el problema con el fin de evitar que siga presentándose. Hasta ahora, tres son las condiciones que se sugieren como necesarias para que se presente una RAA: 1) utilizar agregados reactivos, 2) que la solución de poro del concreto tenga un alto contenido de álcalis y 3) que el concreto

mantenga suficiente humedad (> 80 % H.R.).

En México, y en particular en el área metropolitana del Distrito Federal, que es la principal abastecedora de agregados para concreto de la ciudad, se tienen rocas que contienen minerales que se identifican como reactivos con los álcalis de la solución de poro del concreto. El problema aumenta al saber que los cementos (principales proveedores de álcalis a la solución de poro del concreto) comercialmente disponibles en la ciudad son cementos con alto contenido de álcalis. Teniendo como antecedentes estos dos factores, es posible que se presente una reacción de este tipo.

El estudio emprendido, del cual este trabajo forma parte, está encaminado a determinar la posibilidad de que se presente una RAA al utilizar los agregados y los cementos disponibles en el Distrito Federal. Para la integración de esta primera parte, se pone especial atención a la reacción álcali-silice, y para tal efecto, seis agregados y tres cementos son seleccionados y cuatro los métodos de prueba utilizados.

La presentación de este trabajo es de la siguiente manera: en el primer capítulo, denominado ANTECEDENTES, se hace una breve reseña histórica sobre la RAA y se proporciona información sobre los minerales que le dan origen, el mecanismo deletéreo y algunas medidas que han demostrado en otros países ser útiles para la prevención de cada uno de los tres tipos de reacción.

En el segundo capítulo, denominado CEMENTOS Y AGREGADOS UTILIZADOS EN EL DISTRITO FEDERAL Y AREA METROPOLITANA, se hace un análisis de las características y fuentes de abastecimiento de estos dos componentes principales del concreto.

El tercer capítulo es la parte medular de este trabajo, se denomina: DETERMINACION DE AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS. En él se explica el desarrollo de los cuatro métodos de prueba utilizados y se proporcionan los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Todo el capítulo corresponde a la parte experimental de este estudio.

En el cuarto capítulo, ANALISIS DE RESULTADOS, en base a las recomendaciones de cada método y a los resultados obtenidos en el capítulo anterior se determina finalmente qué agregados son susceptibles a participar en una RAA. Y por último, se proporcionan las CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES derivadas de este trabajo.

Como se mencionó con anterioridad, ésta es apenas la primera parte de un estudio necesario en México y en particular en el área metropolitana del Distrito Federal. Un estudio completo requerirá de mucho tiempo y dedicación en la parte experimental. Valga este trabajo como un pequeño paso en la realización de ese estudio.

I. ANTECEDENTES

El estudio de la reacción álcali agregado (RAA) se realiza desde la primera mitad de este siglo, al aparecer las primeras estructuras de concreto afectadas por esta reacción deletérea. Con el paso de los años se han hecho descubrimientos que han contribuido a dilucidar el problema.

En este capítulo se hace una breve reseña histórica acerca de la RAA y se trata de establecer las premisas que conlleven a la ubicación del tema dentro de la región en estudio, utilizando para ello definiciones, datos y sugerencias aportadas por diversas personas en todo el mundo que han estudiado el problema.

A. Marco histórico.

Dentro de los primeros casos observados de estructuras afectadas por la RAA se encuentra el de la planta hidroeléctrica Buck ubicada en New River (Virginia). La reacción se observó en 1922, diez años después de que la planta fue construida. En 1935, R. J. Holden después de hacer estudios petrográficos al concreto, dedujo que las expansiones y agrietamiento se debían a la reacción química entre el cemento y las rocas utilizadas como agregados.⁽¹⁾

En la misma década de los años 20's, ocurrió algo que permite suponer que México es quizá otro de los países en donde se descubrieron los primeros casos de RAA, pues "en la revista del Instituto Americano del Concreto (Journal ACI), de septiembre de 1948 (pag.84), E. B. Burwel Jr., quien era entonces Jefe de la Sección de Geología y Geofísica de la oficina del Jefe de Ingenieros del Ejército de los E. U. A., informa que en 1928 preparó un informe expresando que un tiempo antes había tenido cierta experiencia en México de la cual deducía en forma resumida que: "les costó una gran cantidad de dinero aprender que la andesita... motiva muchas dificultades en el concreto." El Sr. Burwell comenta que dicha experiencia pudo estar relacionada con la expansión motivada por la reacción álcali-agregado."⁽²⁾

Sin embargo, la mayoría de los autores coinciden en afirmar que fue hasta los años 40's cuando realmente se tuvo la certeza de que cierto tipo de agregados reaccionaban con los álcalis del concreto, esto debido a que en esa década algunos concretos en servicio en E. U. A. mostraron fallas que hicieron que diversas instituciones de ese país desarrollaran intensas investigaciones con el fin de descubrir las causas que las originaron. Los resultados de esas investigaciones permitieron deducir que la mayoría de las fallas se presentaron en concretos que se habían elaborado con

I. ANTECEDENTES

El estudio de la reacción álcali agregado (RAA) se realiza desde la primera mitad de este siglo, al aparecer las primeras estructuras de concreto afectadas por esta reacción deletérea. Con el paso de los años se han hecho descubrimientos que han contribuido a dilucidar el problema.

En este capítulo se hace una breve reseña histórica acerca de la RAA y se trata de establecer las premisas que conlleven a la ubicación del tema dentro de la región en estudio, utilizando para ello definiciones, datos y sugerencias aportadas por diversas personas en todo el mundo que han estudiado el problema.

A. Marco histórico.

Dentro de los primeros casos observados de estructuras afectadas por la RAA se encuentra el de la planta hidroeléctrica Buck ubicada en New River (Virginia). La reacción se observó en 1922, diez años después de que la planta fue construida. En 1935, R. J. Holden después de hacer estudios petrográficos al concreto, dedujo que las expansiones y agrietamiento se debían a la reacción química entre el cemento y las rocas utilizadas como agregados.⁽¹⁾

En la misma década de los años 20's, ocurrió algo que permite suponer que México es quizá otro de los países en donde se descubrieron los primeros casos de RAA, pues "en la revista del Instituto Americano del Concreto (Journal ACI), de septiembre de 1948 (pag.84), E. B. Burwel Jr., quien era entonces Jefe de la Sección de Geología y Geofísica de la oficina del Jefe de Ingenieros del Ejército de los E. U. A., informa que en 1928 preparó un informe expresando que un tiempo antes había tenido cierta experiencia en México de la cual deducía en forma resumida que: "les costó una gran cantidad de dinero aprender que la andesita... motiva muchas dificultades en el concreto." El Sr. Burwell comenta que dicha experiencia pudo estar relacionada con la expansión motivada por la reacción álcali-agregado."⁽²⁾

Sin embargo, la mayoría de los autores coinciden en afirmar que fue hasta los años 40's cuando realmente se tuvo la certeza de que cierto tipo de agregados reaccionaban con los álcalis del concreto, esto debido a que en esa década algunos concretos en servicio en E. U. A. mostraron fallas que hicieron que diversas instituciones de ese país desarrollaran intensas investigaciones con el fin de descubrir las causas que las originaron. Los resultados de esas investigaciones permitieron deducir que la mayoría de las fallas se presentaron en concretos que se habían elaborado con

agregados que procedían de una formación caliza que se caracterizaba por la presencia de magnesita y de sílice.

Instituciones como el Negociado de Riego de los E. U. A., el Cuerpo de Ingenieros del Ejército, y la Asociación de productores de Cemento continuaron investigando casos como los anteriores; así mismo, se realizaron investigaciones en diferentes partes del mundo, tales como Canadá, Inglaterra, Dinamarca, Australia, Alemania, etc.

En Canadá, de las estructuras de concreto afectadas por la RAA, la más vieja es el puente Hurdman construido en Ottawa en 1906 y demolido en 1987.⁽³⁾ Sin embargo no es sino hasta los años 50's que la RAA es documentada en ese país. El puente Lachswehr en Alemania es demolido y reconstruido en 1968 después de sólo unos cuantos años de servicio debido a una RAA.⁽⁴⁾ En 1971, en una presa del Reino Unido, la Val-de-la-Mare, se observan daños en el concreto provocados por una RAA, estos se deben posiblemente a la utilización de una roca triturada que contiene sílice amorfa. En 1981, en ese mismo país se encuentran evidencias de que 23 estructuras de entre 6 y 17 años de edad habían sido dañadas por una reacción de este tipo. Muchas de estas estructuras se construyeron utilizando concreto hecho con agregados dragados del mar y que no se lavaron adecuadamente.⁽¹⁾

En México se tienen algunos casos en donde se sospecha de la ocurrencia de reacciones de este tipo. En una central termoeléctrica de Comisión Federal de Electricidad (C.T. Samalayuca) comenzaron a presentarse agrietamientos a partir del año de 1982. Los agrietamientos tenían la forma típica a los producidos por una RAA. A partir de esa fecha comenzaron a estudiarse las posibles causas que pudieron provocar los daños y no se descarta la posibilidad de que éstos se deban a una reacción del tipo antes mencionado, sin embargo no existen elementos que permitan establecer el origen de los mismos y el problema aún se sigue estudiando.

En 1992, después de observar agrietamientos excesivos en "El Puente Tula", Hidalgo (ubicado en el tramo de la línea de ferrocarril México-Querétaro); se iniciaron algunos estudios para determinar las causas de esos daños. Estudios petrográficos hechos a corazones de concreto extraídos de la estructura, permitieron señalar que los daños no podían ser atribuidos en su totalidad a una reacción del tipo álcali-sílice, pero existían evidencias parciales de este tipo de reacción.⁽⁵⁾

Dentro del Distrito Federal y su área metropolitana, hasta ahora no se han presentado casos de RAA, pero los agregados utilizados en la elaboración de concretos en esta área contienen minerales que han demostrado en diversas ocasiones provocar acciones deletéreas cuando se les utiliza.

Podrá observarse que son muchos y muy diversos los casos que han presentado RAA en el mundo y que México, y en particular la región en estudio, no se encuentra inmune a este tipo de problema; de ahí la conveniencia de estudiarlo, entenderlo y proponer medidas que ayuden a prevenirlo o controlarlo en caso de que se presente.

B. Definición de la reacción.

La durabilidad del concreto puede verse afectada por diversos factores. En forma muy general, estos factores pueden clasificarse en dos grandes grupos: factores externos y factores internos. Los primeros, como su nombre lo indica, son aquellos que aún estando en el exterior del concreto son capaces de atacarlo y causar daños en su interior; el ataque de sulfatos, el intemperismo, la lixiviación, el congelamiento y deshielo y el ataque químico son algunos de los factores que pueden ser clasificados dentro de este grupo. Los segundos, son los originados por la incompatibilidad de los componentes del concreto o por la mala calidad de algunos de los mismos.

Los factores externos son los más comunes, pero cuando se presentan suelen tener manifestaciones localizadas en la estructura y las reparaciones se hacen restaurando la zona afectada y/o eliminando el agente causante o sus efectos.

Los factores internos tienen repercusiones técnicas y económicas más importantes que los externos, pues cuando se presentan lo hacen de una manera generalizada, afectando a todo el concreto de las estructuras, incapacitándolas totalmente a plazos relativamente reducidos y sólo pueden combatirse a través de medidas temporales que ayuden a prolongar un poco la vida de servicio útil.

La reacción álcali-agregado pertenece al grupo de los factores internos y se define como: " la reacción química entre los iones hidróxilo (OH^-) asociados con los álcalis (Na_2O y K_2O) del cemento u otras fuentes y ciertas fases minerales que pueden presentarse en los agregados utilizados en el concreto".

Cuatro son los tipos de reacción álcali-agregado identificados en la actualidad: 1) reacción álcali-sílice, 2) reacción de expansión tardía álcali-silicato/sílice, 3) reacción álcali-carbonato y 4) reacción álcali-silicato. Sin embargo, las dos primeras generalmente se asocian en el nombre de reacción álcali-sílice pues la única diferencia entre ellas es que en la segunda los daños provocados aparecen en periodos de tiempo muy largos (20 años aproximadamente en estructuras de concreto).

El contacto de los iones hidróxilo presentes en la solución de poro del concreto con agregados que contienen material reactivo produce en el caso de las reacciones álcali-sílice y álcali-silicato un gel que tiene la propiedad de tomar agua de su entorno e incharse; de este modo, al principio de la reacción los aumentos de volumen de este gel pueden hallar acomodo en los poros de los agregados y de la pasta hidratada o en los espacios intersticiales entre ambos, pero si la reacción continua y existe suficiente provisión de agua, el gel sigue ensanchándose y puede llegar a fracturar el concreto. Adicionalmente, en el caso de la reacción álcali-silicato, se ha encontrado que la exfoliación de los filosilicatos y el inchamiento de los minerales arcillosos que contienen las rocas susceptibles a esta reacción, contribuyen también a generar fuerzas expansivas que agrietan al concreto y algunos autores atribuyen a este fenómeno y no al inchamiento

del gel los daños producidos.

"En el caso de la reacción álcali-carbonato se dice que el efecto de los álcalis de la solución de poro mas bien consiste en provocar la dedolomitización de las rocas calizas dolomíticas y arcillosas, lo que se evidencia por la formación de 'brucita' que es un mineral con la composición del hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$), y como consecuencia de esta dedolomitización los minerales arcillosos de la roca quedan expuestos a la humedad que la circunda y se expanden."⁽⁶⁾

Hasta ahora, tres son las condiciones aceptadas como necesarias para que los efectos de una reacción álcali-agregado alcancen un grado deletéreo.⁽⁶⁾ Estas deben cumplirse simultáneamente y son las siguientes:

- 1) Los agregados deben contener rocas y minerales reactivos con los álcalis, en las cantidades que sean más desfavorables de acuerdo con su naturaleza.
- 2) La solución de poro del concreto debe tener suficiente proporción de álcalis para generar una reacción deletérea con esos agregados, y
- 3) La estructura debe prestar servicio en condiciones tales que se origine un alto contenido de humedad en el concreto, ya sea en forma permanente o alternada con periodos de secado.

Es de esperarse que si alguna de estas tres condiciones no se presenta, no se originarán en el concreto expansiones excesivas y agrietamientos debidos a la reacción álcali-agregado y no se requerirán precauciones especiales para evitar su aparición.

En las condiciones señaladas anteriormente, tres elementos son de particular importancia: los agregados utilizados en los concretos, los álcalis de la solución de poro y la humedad que el concreto guarda en su interior. Para comprender la reacción álcali-agregado no basta con estudiar a cada uno de ellos aisladamente, es necesario además el estudio de las interrelaciones que puede haber entre dichos elementos.

Con base en la experiencia mundial, se ha observado que existen tres grupos básicos de rocas y minerales que son capaces de reaccionar en grado detrimental con los álcalis del concreto (Tabla 1) y son precisamente estos grupos los que dan nombre a las formas de reacción álcali-agregado identificadas en la actualidad: 1) reacción álcali-sílice (incluyendo la reacción con expansión tardía), 2) reacción álcali-carbonato y 3) reacción álcali-silicato. Cabe señalar que la probabilidad de ocurrencia en México de estos tres tipos de reacción álcali-agregado, así como la frecuencia con la que se han presentado en el mundo tienen un comportamiento similar al orden en que fueron enlistados.

GRUPO REACTIVO	TIPO DE REACCION
1) Diversas rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas que contienen formas de sílice reactiva (vítreo, criptocristalina, microcristalina o cristalina intensamente deformada).	Álcali-Sílice
2) Algunas rocas sedimentarias carbonatadas, que contienen dolomita y minerales arcillosos	Álcali-Carbonato
3) Ciertas rocas metamórficas que contienen filosilicatos, de estructura foliada-reticular.	Álcali-Silicato

Tabla 1. Rocas y minerales que dan origen a los tipos de reacción Álcali-Agregado.(tomada de la referencia 7)

De los grupos señalados en la tabla anterior el que más ha sido estudiado es el que da origen a una reacción del tipo álcali-sílice, debido al gran número de casos que se han presentado. Al principio surgió la idea de no utilizar los agregados que tuvieran sílice, pero esta propuesta era poco ingenieril, pues si se desechaba el uso de esos materiales muy pronto se acabarían las fuentes de agregados, pues la mayoría de las rocas de la tierra contienen sílice. Además, se ha podido comprobar que no todos los agregados que contienen sílice reaccionan con los álcalis de la solución de poro. Para que esto ocurra se necesita que se presenten dos condiciones:⁽⁶⁾

1. Que el agregado contenga la clase de sílice que se ha identificado como reactiva.
2. Que ésta se encuentre en la proporción suficiente para causar la reacción. Influyen también para que se presente la reacción el tamaño y la distribución granulométrica de las partículas.

La sílice que se identifica como reactiva con los álcalis corresponde a la llamada sílice inestable, que comprende los estados vítreo, criptocristalino, microcristalino y, en ocasiones el cristalino intensamente deformado. Estas formas de sílice se encuentran presentes en minerales como el ópalo, la calcedonia, la tridimita y la cristobalita.

Las rocas que con mayor frecuencia contienen sílice en sus formas reactivas son:

1. Rocas silíceas, tales como el pedernal (con ópalo y calcedonia) y las calizas y dolomitas silíceas.
2. Rocas volcánicas ácidas e intermedias (con vidrio volcánico), como las riolitas, latitas, dacitas, andesitas y sus respectivas tobas.
3. Algunas formas de cuarzo criptocristalino, cristalino intensamente deformado o microcristalino.

Con respecto a los materiales que son clasificados dentro del segundo y tercer grupo de la Tabla 1, sólo puede decirse que su aparición en los problemas de reactividad álcali-agregado ha sido limitada, pero no por eso deja de ser importante. En el caso de la reacción álcali-carbonato se ha señalado que sólo se ha presentado en las rocas calizas que contienen dolomita y minerales arcillosos y en el caso de la reacción álcali-silicato se señala que ésta sólo se ha presentado en rocas que contienen filosilicatos, de estructura foliada-reticular.

Por tanto, es obvio que es indispensable conocer los constituyentes de un agregado a través de un examen petrográfico y determinar si es que cae dentro de alguno de los tres grupos reactivos señalados en la Tabla 1. En el examen petrográfico se determinan las características físicas y químicas del material, así como la clasificación y cuantificación de cada uno de los constituyentes, con el fin de determinar la ingerencia que estos pudieran tener en el uso que se pretenda dar al agregado.

La siguiente tabla muestra en forma resumida los tipos de roca que participan en las reacciones álcali-agregado, así como los componentes reactivos y la existencia en México de las mismas.

TIPO DE ROCA	COMPONENTE REACTIVO	EXISTENCIA EN MEXICO
1. Reacciones álcali-silice.		
- Rocas que contienen ópalo, (rocas calcedonias, calizas silíceas y pedernales; ciertas pizarras y areniscas).	Opalo, tridimita	Reducida
- Rocas volcánicas vítreas (riolitas, dacitas, latitas, andesitas y sus tobas; ciertos basaltos).	Silice amorfa	Muy frecuente
- Rocas de alto contenido de sílice (ortocuarcitas, areniscas, granito microcristalino (aplita), ciertos esquistos).	Cuarzo cristalino (sólo reactivo si es microcristalino o está muy deformado).	Regular
2. Reacciones álcali-carbonato.		
- Calizas dolomíticas arcillosas y otras rocas dolomíticas.	Dolomita metaestable, y tal vez, calcita criptocristalina.	Regular
3. Reacciones álcali-silicato		
- Grauvacas, argilitas, filitas, algunos esquistos y pizarras.	Hidromica (illita)	Regular

Tabla 2. Rocas y minerales que normalmente participan en las reacciones álcali-agregado (tomada de la referencia 7)

Una vez delimitada la primera condición para que se presente una reacción del tipo álcali-agregado (agregados reactivos), es posible comenzar a analizar la segunda condición (álcalis de la solución de poro).

Se ha observado que los hidróxidos existentes en el fluido que ocupa los poros de una pasta de cemento hidratado lo hacen convertirse en una solución altamente básica ($\text{pH} > 12$). Los que destacan por su cantidad así como por su importancia son los hidróxidos de sodio y de potasio que corresponden al grupo de los llamados metales alcalinos. El principal proveedor de óxidos de sodio y de potasio, o álcalis, al concreto es el cemento. En diversos estudios realizados con el fin de determinar la relación de los álcalis con el pH de la solución de poro, se ha encontrado que éstos lo incrementan significativamente. Los valores varían de 12.7 a 13.1 para cementos con bajo contenido de álcalis hasta 13.5 a 13.9 para cementos con alto contenido de álcalis (Hobbs 1988). Más aún, se determinó que en estado de equilibrio, el ion (OH^-) en la solución de poro es una función lineal del contenido total de álcalis del cemento usado (Diamond 1989).

Del contacto de la solución descrita anteriormente, con agregados de diferentes tipos y minerales reactivos se derivan las tres clases de reacción conocidas. Sin embargo, es conveniente aclarar que para que estas reacciones tengan efectos expansivos, es necesario que "la solución de poro manifieste un grado de alcalinidad (definido por su contenido de hidróxidos alcalinos) que exceda un cierto nivel, o umbral de riesgo, el cual puede variar de acuerdo con la naturaleza de la reacción".⁽⁶⁾

Pero, ¿de dónde provienen los álcalis de la solución de poro a los que se ha hecho alusión?. Ya se ha mencionado que el cemento es el principal proveedor, aunque éstos eventualmente pueden provenir de otras fuentes como el agua de mezcla, aditivos e incluso de los agregados. Las materias primas que se utilizan en la elaboración del cemento (calizas, arcillas, etc.) suelen contener sodio y potasio y una vez elaborado el cemento; estos elementos se expresan en forma de óxidos (Na_2O y K_2O). La suma total de estos óxidos representa el contenido total de álcalis en el cemento.

Comúnmente se expresa el total de álcalis del cemento en términos de óxido de sodio (Na_2O), esto se hace convirtiendo el óxido de potasio (K_2O) a su equivalente en Na_2O . Para ello se utiliza la siguiente expresión:⁽⁶⁾

$$\text{Álcalis totales en cemento (expresados como } \text{Na}_2\text{O)} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O} \quad (1)$$

Esta expresión resulta de dividir el potasio entre su peso molecular (94.2) y multiplicarlo por el peso molecular del sodio (61.98).

Numerosos estudios experimentales efectuados después de las primeras observaciones de la reacción demostraron que el riesgo de que esta se presente provocando acciones deletéreas cuando se utilizan agregados reactivos se elimina prácticamente cuando se utiliza un cemento portland con un contenido de álcalis inferior a 0.60%. Esto es un punto muy importante, pues comúnmente el contenido de álcalis

totales del cemento portland suele fluctuar entre 0.3 y 1.5 por ciento, aproximadamente.

Sin embargo, en algunos países se ha decidido tomar en cuenta las aportaciones de álcalis que pudiera sufrir el concreto de otras fuentes diferentes a la del cemento y se ha optado por limitar el contenido de álcalis de la mezcla a 3 kilogramos de álcalis solubles en un metro cúbico de concreto cuando se emplean agregados reactivos. Bajo esta consideración, el contenido de álcalis totales en la mezcla se obtiene sumando las aportaciones de cada uno de sus componentes.

Es importante señalar que cuando existe la sospecha de que pudiera presentarse una reacción álcali-carbonato la restricción en cuanto al contenido de álcalis del cemento es más estricta y el límite permisible disminuye hasta 0.40 por ciento.

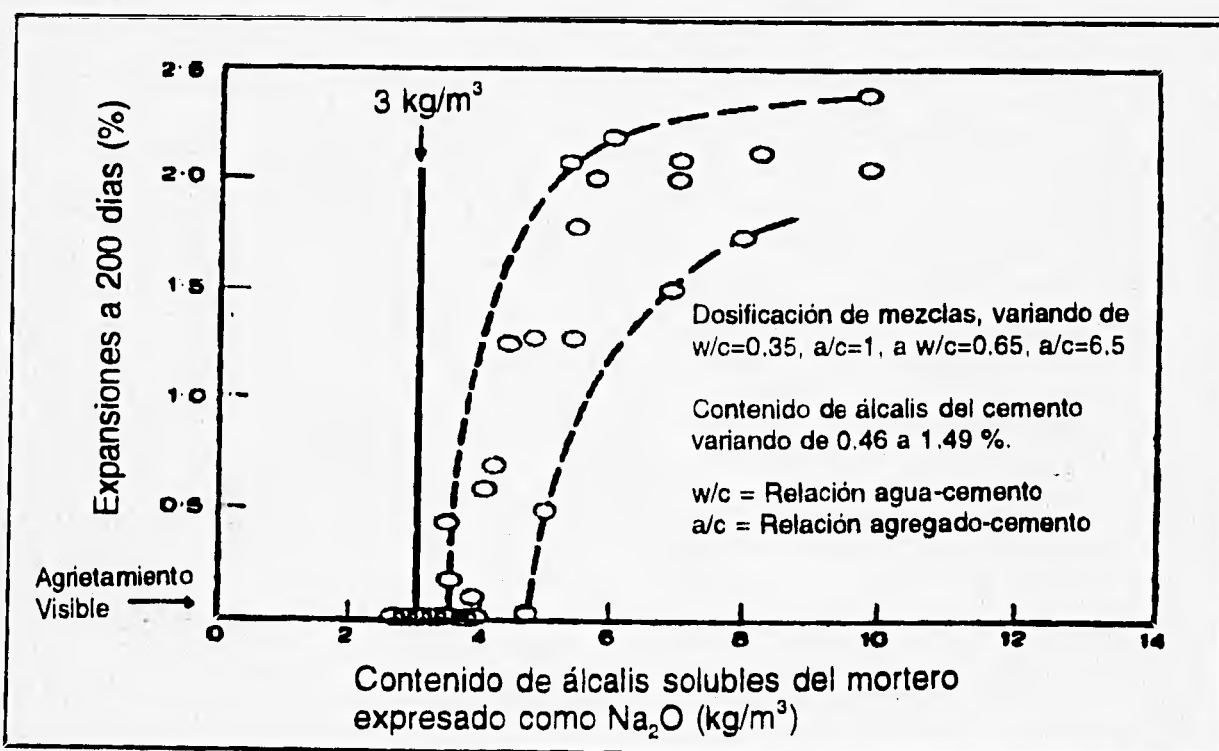


Fig. 1. Resultados experimentales obtenidos en Gran Bretaña al variar el contenido de álcalis (expresados en kg/m^3) en mezclas de mortero. Nótese que después de un contenido de álcalis de 3 kg/m^3 en los morteros, las barras elaboradas con ellos presentan expansiones deletéreas. (Tomada de la referencia 9)

Ahora bien, si no existen otras fuentes de suministro de álcalis diferentes al cemento, el contenido de álcalis por metro cúbico de concreto se puede calcular con la siguiente expresión:

$$A = C (a/100) \quad (2)$$

En donde:

- A = Contenido de álcalis del concreto (kg/m^3)
 C = Contenido de cemento portland del concreto (kg/m^3)
 a = Contenido de álcalis del cemento portland (%)

Utilizando esta misma ecuación, si se desea emplear el criterio de limitar el contenido de álcalis del concreto a 3 kg/m^3 , la expresión que proporciona el máximo contenido de cemento portland en la mezcla es:

$$\text{MCC} = (300/a) \text{ kg/m}^3 \quad (3)$$

En donde:

- MCC = Máximo contenido de cemento portland por m^3 de concreto
 a = Contenido de álcalis del cemento portland (%).

La siguiente tabla, elaborada utilizando la expresión anterior, puede ayudar a conocer el contenido máximo de cemento por metro cúbico de concreto que se puede utilizar, si se conoce el contenido de álcalis del cemento y suponiendo que no habrá aportación de álcalis de fuentes diferentes al cemento.

CONTENIDO DE ÁLCALIS DEL CEMENTO COMO Na_2O EQUIVALENTE (%)	MAXIMO CONTENIDO DE CEMENTO (kg/m^3)
1.20	250
1.00	300
0.86	350
0.75	400
0.67	450
0.60	500
0.55	550

Tabla 3. Máximo contenido de cemento por metro cúbico de concreto cuando se conoce el contenido de álcalis del cemento, utilizando el criterio de limitar el contenido de álcalis de la mezcla a 3 kg/m^3 .

En la tabla podrá observarse que el criterio de limitar el contenido de álcalis del cemento a 0.60 % es más estricto que el que propone como límite máximo los 3 kg/m^3 en el concreto, pero esto sólo ocurre en las mezclas en donde se utilizan contenidos de cemento de 500 kg/m^3 o menos. En aquellas mezclas en donde se utilizan contenidos de cemento de más de 500 kg/m^3 el criterio de los 3 kg/m^3 es más conservador y exige

contenido de álcalis de los cementos menores a 0.60%. Sin embargo, con algunos agregados, el criterio de limitar los álcalis a 3 kg/m³ de concreto no ha arrojado buenos resultados y algunos autores sugieren aplicarlo sólo si existen pruebas con los agregados que aseguren un buen comportamiento de los concretos.

Los álcalis están íntimamente ligados al tercer elemento que se ha identificado como indispensable para que ocurra una reacción álcali-agregado: la humedad del concreto. La humedad interna del concreto juega un papel preponderante en el mecanismo de la reacción álcali-agregado. La humedad no sólo asegura la presencia de la solución de poro, sino que provee el agua necesaria para que los productos de la reacción originen expansiones.

Pero, ¿por qué existe humedad interna en el concreto?. La respuesta a esta interrogante es la siguiente: del total de agua utilizada en la mezcla sólo una parte reacciona con el cemento y la restante permanece atrapada en los poros del concreto endurecido. Es esto lo que propicia humedad interna.

Esta agua se puede llegar a desalojar del concreto por medio de evaporación, pero podría incrementarse o reponerse por agua proveniente del exterior. Es por eso que no sólo las estructuras que tienen contacto permanente con el agua están propensas a sufrir una reacción del tipo álcali-agregado, sino también aquellas en donde el contacto es esporádico tales como puentes, pavimentos, durmientes de concreto, etc. Inclusive se cree que en ocasiones es más riesgoso el humedecimiento temporal del concreto, pues durante el período de secado, el movimiento de la humedad hacia las superficies en donde se evapora, provoca un desplazamiento de los álcalis hacia zonas en donde se incrementa la concentración de los mismos en la solución de poro y de esta manera aumenta el riesgo de que se presente la reacción. Otro caso de movimiento de humedad a través del concreto se da en aquellas estructuras que tiene un paramento seco y otro húmedo (presas de concreto, tanques de almacenamiento, etc.)

La diversidad de casos y condiciones bajo las que se presenta este problema ha provocado que se desarrollen numerosas investigaciones con el fin de determinar con mayor precisión la influencia de la humedad en la reacción, la mayoría de ellas se ha encaminado a la reacción álcali-sílice en particular debido a la frecuencia de la misma. Así por ejemplo, en 1990 en Estados Unidos, Stark ⁽³⁾ realizó una investigación de campo utilizando estructuras afectadas que arrojó puntos muy importantes con respecto a esta reacción (álcali-sílice). Esos puntos son esencialmente los siguientes:

1. Para que se mantenga la continuidad de la reacción álcali-sílice es necesaria una humedad relativa en el concreto de por lo menos 80% referida a una temperatura de 21 a 24 °C. Se considera a este grado de humedad en el concreto el umbral de riesgo para el desarrollo de reacciones deletéreas.

2. En la mayoría de las condiciones climáticas, la humedad del concreto de la estructura es suficientemente alta para que la reacción se presente en forma sostenida.

3. En clima desértico y árido las estructuras de concreto (no expuestas a la humedad) pueden mostrar ocasionalmente niveles de humedad interna suficientemente bajos para restringir temporalmente el desarrollo de la reacción, en tanto no cambien estas condiciones.

4. Las estructuras de concreto masivo, aún en clima desértico, pueden conservar durante prácticamente toda su vida útil el grado de humedad interna suficiente para el desarrollo continuo de la reacción con la consiguiente manifestación de sus efectos expansivos.

5. Este es el último punto, y señala que temperaturas moderadamente elevadas pueden ser efectivas para secar superficies de concreto y prevenir expansiones debidas a la reacción.

Estas cinco conclusiones derivadas de la investigación de Stark dieron un cambio sustancial a las investigaciones realizadas sobre la reacción álcali-sílice, pues demostraron que no era necesario que la estructura prestara servicio en contacto con el agua para que ésta se presentara como se creía hasta entonces y que, suponiendo que se utilizaran agregados reactivos y se tuviera una alta concentración de álcalis en la solución de poro, sólo era necesario que se excediera el umbral de riesgo (humedad relativa del 80% en el concreto) para que la reacción apareciera.

Subsecuentes investigaciones, determinaron también mediante pruebas de laboratorio, que el gel silícico-alcálico producto de la reacción pierde su capacidad para hincharse y generar presión después de un envejecimiento previo de cuatro meses. Observación por demás importante, pues si se verificara el mismo comportamiento en el concreto, la protección temporal contra la humedad en una estructura de concreto, no sólo retardaría la posibilidad de los efectos dañinos de una reacción álcali-sílice sino que la eliminaría (o por lo menos la reduciría a límites inofensivos).

Así, la humedad interna del concreto y los álcalis de la solución de poro crean las condiciones para que los agregados del concreto comiencen a sufrir una alteración en su estructura y se originen acciones deteriorantes. Pero, ¿cómo se puede identificar a una estructura que ha sufrido una RAA?; en realidad resulta difícil el diferenciar cuándo una estructura ha sido deteriorada por este tipo de reacción y cuándo por algún otro factor. Algunas de las características que pueden ayudar a identificar a estructuras que han sufrido una RAA son: expansiones diferenciales y deformación de los elementos que la integran, agrietamiento de los elementos y en algunos casos incluso desmoronamiento, y en el caso de la reacción álcali-sílice exudaciones de gel por las grietas superficiales.

El examen petrográfico de corazones extraídos de elementos de estructuras afectadas es muy útil para identificar la reacción, ya que a través de un microscopio se pueden observar características de los componentes del concreto que a simple vista no sería posible detectar.

Desde el punto de vista ingenieril, las propiedades mecánicas del concreto cuando éste ha sufrido una RAA se ven disminuidas. De mayor a menor grado, las propiedades afectadas son:⁽¹⁰⁾

1. Resistencia a la tensión pura y a la flexión. Con una expansión del 0.1 %, la resistencia a la flexión puede verse disminuida hasta en un 50 %.

2. Módulo de elasticidad. Con la misma expansión indicada en el punto anterior, la pérdida en el módulo elástico es de aproximadamente 20 %.

3. Resistencia a la fatiga.

4. Resistencia a la compresión y tensión indirecta.

Las propiedades que se afectan más, son también las que sufren el daño más rápidamente. Es por eso que resulta muy importante detectar de inmediato cuándo una estructura ha sido afectada por una reacción de este tipo. Aunque resulta mucho más importante el tratar de prevenirla. Para ésto, se deben seguir algunos lineamientos:

Primero. Es muy importante que las medidas que puedan tomarse para prevenir una reacción álcali agregado y que involucren a la mezcla nunca deben incluir el uso de materiales, contenidos de cemento o relaciones agua-cemento que sean inadecuadas para asegurar la durabilidad del concreto.

Segundo. Debe tenerse mucho cuidado también en no afectar algunas otras propiedades y características del concreto tales como el color, la trabajabilidad, la resistencia a edades tempranas y posteriores, calor de hidratación, fraguado, etc. El costo, la disponibilidad y conveniencia de usar materiales, mezclas o métodos de construcción son también consideraciones que deben observarse cuando se trata de prevenir la reacción.

Algunas medidas adoptadas hasta ahora para prevenir la reacción, mencionadas en este capítulo, fueron propuestas tomando los lineamientos anteriores. Estas son:^(11, 12, 13 y 14)

1. Limitar a 3 kg/m^3 el contenido total de álcalis en el concreto. Este criterio puede aplicarse en la mayoría de las construcciones normales y sólo si se cuenta con información de los agregados que respalden este criterio.

2. Limitar el contenido total de álcalis del cemento a 0.60% ($\text{Na}_2\text{O eq.}$) en mezclas en donde el contenido de cemento sea menor de 500 kg/m^3 . Y en mezclas con contenidos de cemento superiores al anterior aplicar la primera propuesta. Este criterio debe aplicarse en estructuras especiales, donde la seguridad estructural es muy importante, o en estructuras en donde se requiere una larga vida de servicio.

Y cuando se sospecha que podría haber una fuente adicional de álcalis:

3. Asegurarse de que el material es inocuo, y en caso de que no lo sea, cambiar de fuente de suministro.

4. En caso de que no pudiera garantizarse la inocuidad del material, compensar la aportación de álcalis de la fuente externa por una disminución de los álcalis en el concreto o en los materiales cementantes.

Aunadas a estas, existen otras medidas que pueden ayudar a disminuir el riesgo de expansiones deletéreas debidas a la reacción. Su adopción es relativamente sencilla y los daños que pueden prevenir son muchos. Estas medidas son aplicables antes y después de la elaboración de concreto, y son:⁽⁶⁾

1. Antes de la elaboración del concreto.

- Considerar resistencias del concreto ($f'c$) moderadas en el diseño estructural.
- Contar con el equipo y mano de obra adecuados para lograr una uniformidad aceptable en la resistencia del concreto y disminuir los márgenes de seguridad adoptados para cumplir con las especificaciones.
- Utilizar hasta donde sea posible mezclas con bajo revenimiento.
- Utilizar aditivos que permitan reducir el contenido de agua de las mezclas.
- Lavar los agregados. Con esto se eliminarán los finos que aumentan los requerimientos de agua en las mezclas.
- Los aditivos inclusores de aire pueden también ser utilizados para impedir el movimiento de la humedad en el concreto. Las burbujas de aire son recintos en donde se pueden alojar los productos de la reacción y con ello disminuyen las fuerzas expansivas.

2. Después de la colocación del concreto.

- Tratar de mantener secas a las estructuras y sobre todo tratar de impedir ciclos de humedecimiento y secado en sus miembros.
- A las estructuras con grandes superficies horizontales, dotarlas de un buen drenaje de aguas pluviales.
- En muros que tengan contacto con agua o con el suelo, impermeabilizar las superficies de contacto.

- En las cimentaciones, es conveniente impermeabilizar el terreno y utilizar un aditivo hidrófugo con el fin de disminuir la absorción de agua por capilaridad en el concreto endurecido.

Las medidas anteriores pueden adoptarse utilizando cemento portland solamente, o utilizando el cemento mezclado con alguna puzolana que no contribuya con álcalis o que haya demostrado ser eficaz para inhibir la reacción álcali-agregado.

Con respecto a las puzolanas (humo condensado de sílice, ceniza volante y escoria de alto horno granulada), algunos investigadores han intentado explicar los mecanismos de cómo es que inhiben la reacción, y han llegado a la conclusión de que éstas: 1) diluyen el contenido total de álcalis del concreto, 2) reducen la permeabilidad, lo cual reduce la movilidad de los iones hidróxidos alcalinos y el agua en la pasta, 3) integran los iones alcalinos en la estructura de los nuevos hidratos y 4) agotan progresivamente el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la reacción puzolánica.^(15 y 3)

Podrá observarse que son muchos los factores involucrados en el desarrollo de una reacción álcali-agregado y que de ninguna manera debe subestimarse el problema, pues los daños que ella podría acarrear son muchos. En los siguientes apartados de este capítulo se señalarán los puntos de mayor interés de cada uno de los tipos de RAA.

1. Reacciones álcali-sílice y álcali-silicato.

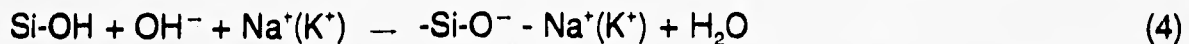
Como se señaló con anterioridad, la reacción álcali-sílice es la de mayor ocurrencia en el mundo. A ella se han dedicado innumerables investigaciones que han aportado datos que han servido para un mejor entendimiento de la misma. De acuerdo con Diamond (1989), "en el proceso de la reacción álcali-sílice se involucra a un sólido (el agregado reactivo) y a un líquido (la solución de poro) y puede ser clasificada como una reacción química heterogénea sólido-líquido. La reacción álcali-sílice no se presenta cuando el líquido se retiene en los poros del sólido y los constituyentes sólidos reactivos sólo forman una parte pequeña e irregularmente distribuida en la constitución total del sólido."⁽³⁾

Es por lo anterior que se admite generalmente que la reacción química entre los hidróxidos alcalinos y la sílice reactiva es esencialmente una reacción de disolución, pues se desarrolla un incremento en la solubilidad debido al carácter amorfo, desordenado o pobremente cristalizado de las formas de los minerales silícicos en soluciones altas en pH (como la solución de poro del concreto, en donde existe un incremento de álcalis a medida que se consume el agua que los contiene diluidos, a través de la hidratación del silicato de calcio y los procesos aluminatos o simplemente por evaporación durante el período de secado).

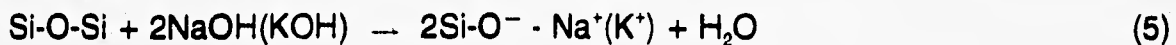
El mecanismo de reacción entre las partículas de agregado reactivo y la solución

alcalina puede ser resumido de la siguiente manera.^(16 y 3)

1. El primer paso es una reacción de neutralización ácido-base donde los iones hidróxido de la solución de poro del concreto atacan los grupos de silanol (Si-OH) presentes en la superficie de la partícula para formar una molécula libre de agua, dejando un hueco por el oxígeno desplazado con carga negativa que puede ser ocupado por un ión alcalino (K^+ , Na^+).



2. Al mismo tiempo, los iones hidróxido atacan el puente fuerte de siloxeno (Si-O-Si) cercano a la superficie de la fase o mineral. La carga negativa creada por el rompimiento de los puentes de siloxeno se compensa con los iones alcalinos (Na^+ , K^+) penetrando en la partícula reactiva.



3. Como consecuencia de los pasos 1 y 2, los hidróxidos alcalinos penetran en la partícula de sílice, rompiendo su estructura.

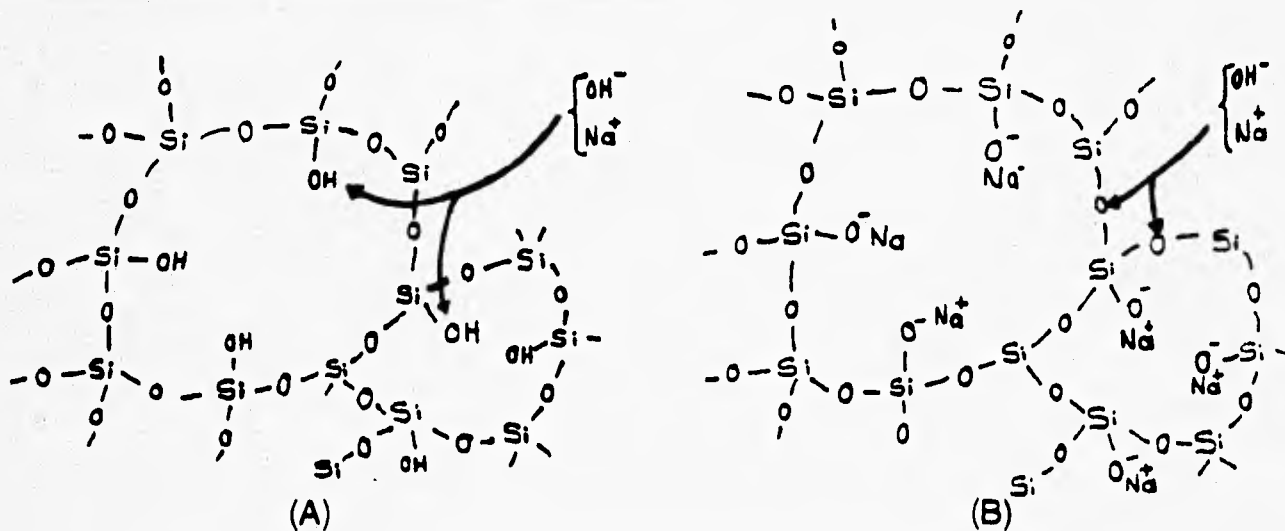


Fig.2. Esquemización de la reacción entre los iones hidróxido de la solución de poro del concreto y sílice pobremente cristalizada. (figura tomada de la referencia 3)

En la figura, se distinguen dos estados, estos son:

A. Los iones hidróxido atacan primeramente a los grupos de silanol (Si-OH). La carga del oxígeno desplazado es balanceada por los iones alcalinos (K^+ , Na^+), que simultáneamente se difunden en el interior de la estructura.

B. Al mismo tiempo, los iones hidróxido atacan el duro puente siloxeno (Si-

O-Si). Esta reacción hace que se pierda la estructura de la fase sílica y los iones hidróxilo pueden penetrar con más intensidad en ella.

El mecanismo explicado permite deducir por qué es que las formas de sílice que tienen buena estructura no son reactivos con la solución de poro. Es claro que al contar con una estructura fuerte y bien definida los hidróxilos se ven impedidos de precipitarse al interior de la partícula y en consecuencia los álcalis no pueden penetrarla y hacerla perder su estructura.

Posteriormente al mecanismo de reacción se genera otro al que se le ha llamado mecanismo de expansión o mecanismo deletéreo del concreto. Existen diferentes teorías que han tratado de explicar el mecanismo de expansión causado por la reacción álcali-sílice. La teoría más simple señala que el agrietamiento es el resultado directo del ensanchamiento de las piezas de agregado reactivo que al hidratarse sufren un aumento en su volumen y provocan presiones internas que son capaces de llevar al concreto a la ruptura.

Una teoría muy reciente sobre el mecanismo de expansión está basada en la hipótesis de que el Ca(OH)_2 libre en la pasta de cemento juega un papel crítico en el proceso de expansión de la reacción álcali-sílice, pues permite que los iones alcalinos penetren en el agregado reactivo y sella al mismo agregado para que no exista un lechadeo de sílice disuelta. El modelo fue desarrollado por Chatterji et al. y señala que "cuando la concentración de álcalis es alta en la solución que rodea a la partícula reactiva, los iones hidróxilo penetran al agregado reactivo y rompen la estructura sílica, formando así una solución compuesta de silicatos disueltos de sodio y de potasio que tratan de salir del grano. Esta salida es, sin embargo, impedida por los iones de calcio localizados entre la interfase cemento-agregado, los cuales precipitan los silicatos alcalinos como geles cálcico-álcali-sílicos. Las fuerzas expansivas se generan por el hecho de que es mayor la cantidad de iones hidróxidos que penetran al grano reactivo que la cantidad de sílice disuelta que sale de él. Estos movimientos relativos son controlados por la concentración de álcalis en la solución de poro que rodea a la partícula reactiva, quien también controla la concentración de iones de calcio en solución. En el mecanismo de Chatterji, el producto de la reacción no requiere de una capacidad expansiva."⁽³⁾

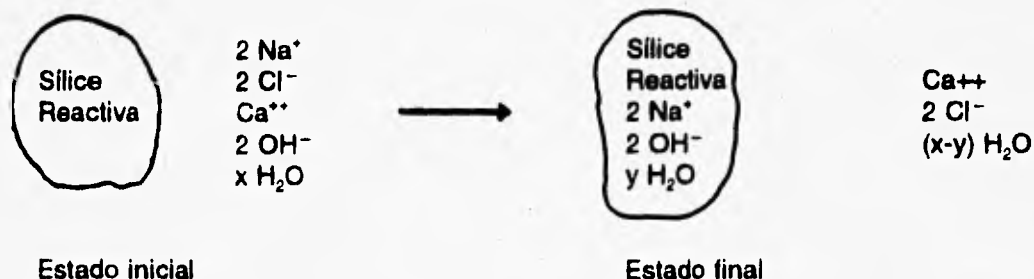


Fig. 3. Mecanismo de expansión de una fase sílica reactiva en el concreto sugerido por Chatterji et al.

El último punto señalado en el párrafo anterior referente al producto de la reacción es lo que ha sido criticado fuertemente a esta teoría por numerosos investigadores, pues diferentes pruebas de laboratorio hechas con geles sintéticos de composición variada en soluciones alcalinas ⁽³⁾ revelaron que éstos pueden generar presiones hasta tres veces mayores que la resistencia a tensión del concreto. Aunque, esta teoría debe de ser tomada en cuenta al tratar de explicar el mecanismo de expansión pues puede ser que, en efecto, las presiones generadas por el movimiento diferencial de los iones entre las partículas reactivas y la solución de poro contribuyan a generar fuerzas expansivas; además, desde los años 50's los ingenieros Mather y Verbeck insistieron en que la Ca(OH)_2 liberada durante la hidratación del cemento ayuda para que el producto de la reacción entre los hidróxidos alcalinos (NaOH y KOH) y la sílice de los agregados sea un silicato cálcico-alcalino equilibrado, no deletéreo; punto retomado por Chatterji et al.

La teoría de mayor aceptación hasta ahora es aquella que indica que después del mecanismo de reacción, un gel álcali-sílico comienza a formarse. ^(17 y 3) Esta teoría señala que al principio el gel es probablemente muy viscoso, pero su viscosidad disminuye a medida que comienza a absorber agua de la pasta. Además indica que, si la relación sodio/sílice en la reacción es alta, el producto formado puede aparecer como un gel relativamente denso y rígido, y que desde el punto de vista fisicoquímico ambos productos son esencialmente iguales.

Para esta teoría dos tipos de presiones son fácilmente distinguibles cuando el producto de la reacción comienza a tomar agua: la presión osmótica y la de abundamiento. La presión osmótica se genera cuando el silicato alcalino producto de la reacción está en solución y éste presenta cierta tendencia a aumentar su contenido de agua. Si el producto es relativamente rígido y denso, pero constituye un gel coloidal, su tendencia a tomar mayor cantidad de agua se designa como presión de abundamiento.

Los ingenieros Mather y Verbeck hicieron grandes aportes a esta teoría y algunos estudios actuales siguen apoyándose en los resultados que ellos obtuvieron. Ellos señalaron que "cuando en el ataque a la sílice, la disponibilidad relativa ión alcalino/ión cálcico es alta, se presentará abundamiento deletéreo o productos osmóticos; pero cuando la relación precitada es menor, se obtendrán productos de equilibrio silicatos-cálcico-alcalinos no deletéreos". ⁽²⁾

Al estar el producto de la reacción confinada por la pasta de cemento que funciona como membrana semi-permeable, las presiones ya sean osmóticas o por abundamiento originan que se desarrollen expansiones y la consecuente ruptura del concreto. Las fracturas provocadas de esta forma sirven para alojar al gel que sigue expandiéndose; y si el gel sigue tomando agua, provoca tensiones que hacen que las fracturas originales se agranden y lleguen hasta la superficie del concreto generando un patrón típico de agrietamiento en él. Posteriormente comienzan a surgir exudaciones de las grietas de la superficie.

La formación de las grietas contribuye a que la resistencia y elasticidad del concreto disminuyan, acelera también otros procesos de deterioración del concreto debido a que permite el acceso del agua y otros agentes.

Hasta nuestros días esta teoría ha sido muy aceptada pues pruebas de laboratorio y de campo en diversas partes del mundo han permitido corroborar sus propuestas.

Una vez que el mecanismo deletéreo comienza, no puede pararse si no desaparecen los factores (alguno o todos) que le dieron origen (humedad, álcalis, agregado reactivo). El mecanismo es relativamente lento; en algunas estructuras los indicios de una reacción álcali-silice pueden aparecer dentro del primer año de servicio, en otras éstos pueden presentarse a los siete, diez o más años; y ellos se ven evidenciados por una expansión de los elementos afectados que hacen que incluso la misma estructura tenga un movimiento diferencial (observado en el cierre de las juntas constructivas, si es que las hay, y el desalineamiento de algunos miembros) con un posterior agrietamiento y exudación de gel por las grietas que al estar expuesto a la superficie tiende a endurecerse y a tomar un color blanquecino.

La historia del deterioro puede ser más compleja que la identificación de las causas primarias que le dieron origen y puede ser determinada sólo con estudios químicos y petrográficos. Al respecto, cabe señalar que el mejor criterio para reconocer una reacción álcali-silice en el concreto es indudablemente la presencia del gel silicico-alcálico. El gel se encuentra presente en poros de las partículas de agregados, en cavidades de la pasta de cemento, en fracturas, y como se ha señalado, en exudaciones de superficies externas. Comúnmente llena la zona existente entre la parte perimetral del agregado y la pasta de cemento.

Las propiedades físicas de geles observados en concretos deteriorados varían considerablemente, dependiendo principalmente del contenido de agua y grado de carbonatación. Estos productos de la reacción álcali-silice pueden ser suaves, viscosos, o en algunas ocasiones duros y quebradizos. Estudios petrográficos indican que antes de que ocurra un fracturamiento del concreto, los geles son altamente viscosos.

"El índice de refracción del gel silico en concreto es bajo, pero varía con el contenido de agua. Los geles disecados tienen índices que varían de 1.46 a 1.49. Estos, muestran una variación en el grado de transparencia y comúnmente presentan grietas que son el resultado de contracciones por secado. Microscópicamente los geles se observan frecuentemente con cierta incapacidad en la transmisión de luz, debida a la presencia de inclusiones muy finas. Algunas veces, la presencia en ellos de pequeñas partículas, sugiere que se observa carbonato de calcio, aunque esto no se ha podido confirmar."⁽¹⁰⁾

Análisis químicos de muestras de gel tomado de varias estructuras de concreto afectadas muestran que la composición del gel es esencialmente sílice y álcalis, y contienen pequeñas cantidades de CaO , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . La pérdida por ignición es

variable; pero en ella predomina H_2O y algunas veces CO_2 . Los contenidos de SiO_2 varían de 50 a 85 por ciento y la suma de Na_2O y K_2O de 6 a 26 por ciento. Se ha encontrado que el Na_2O excede considerablemente al K_2O .⁽¹⁸⁾

Adicionalmente, existen otras dos características de los componentes del concreto que permiten identificar cuándo ha ocurrido una reacción álcali-sílice. La primera, es la apariencia manchada de la pasta de cemento; esta se debe a que ante la presencia de material gelatinoso, la pasta tiende a absorberlo, lo que le provoca esa apariencia. La segunda, es la ocurrencia de una alteración en los bordes de partículas de agregados de ciertos tipos de roca. Esta alteración se manifiesta por una forma redondeada de las partículas, sin embargo, es necesario demostrar que esos bordes se formaron después y no antes o durante la colocación del concreto. Esto resulta difícil de probar y en consecuencia este criterio es menos utilizado que el de la presencia de gel; requiere además una experiencia considerable por parte del observador.

Los bordes alterados lucen diferente dependiendo de la manera en que se examinan. Si la superficie fracturada de la partícula de un agregado afectado es observada con luz reflejante, los bordes se observan oscuros en contraste con el interior de la partícula. Cuando se examina una sección delgada con el microscopio petrográfico usando luz transmitida, los bordes generalmente tienen una mayor transparencia que el interior de la partícula de roca. Por esta razón, esas zonas perimetrales reciben el nombre de "bordes claros". La clarificación es probablemente provocada por la combinación de dos procesos, la remoción de algunos de los constituyentes de la roca por disolución y por un incremento en la homogeneidad óptica provocado por una penetración del gel dentro de los intersticios de la roca. Este tipo de bordes ha sido observado con particular frecuencia en cristales de andesita y riolita.

Adicionalmente se ha intentado también, aunque en algunos casos con poco éxito, relacionar la ocurrencia de algunos componentes químicos en el concreto con la presencia de la reacción álcali-sílice. Por ejemplo el hidróxido de calcio (que es un producto de la hidratación del cemento portland que se presenta en todos los concretos), el carbonato de calcio (característico de los concretos expuestos a la intemperie), el sulfoaluminato de calcio (característico de los concretos atacados por sulfatos y congelamiento y deshielo), sulfato de calcio (presente en concretos atacados por sulfatos) y otros componentes que se presentan en algunos casos raros.⁽¹⁸⁾

De particular interés para los investigadores han sido también otros dos aspectos de la reacción álcali-sílice: la identificación del llamado "contenido pésimo de material reactivo en una mezcla", y el efecto del tamaño de la partícula de agregado en la reacción. Estos dos aspectos han sido muy discutidos, y no siempre los investigadores llegan a las mismas conclusiones, pero es posible mencionar algunos puntos de interés.

En algunas pruebas de laboratorio se ha encontrado que la expansión de especímenes está relacionada con el contenido de material reactivo de los agregados utilizados en su elaboración. Las expansiones se incrementan a medida que se

incrementa el contenido de agregado reactivo hasta llegar a una expansión máxima; a partir de ahí, las expansiones comienzan a decrecer si se sigue aumentando el contenido de agregado reactivo. A la cantidad de material reactivo que conduce a una mayor expansión es a lo que se le llama "contenido pésimo de material reactivo". La explicación que se ha encontrado a este comportamiento es la siguiente: a alto contenido de agregado reactivo, la concentración de álcalis en la solución de poro se reduce hasta un umbral no riesgoso (la disponibilidad de álcalis por unidad de área de agregado reactivo es menor) durante la colocación y endurecimiento de la mezcla, y la formación del gel produce expansiones insignificantes; por el contrario a un contenido intermedio de agregado reactivo la reacción continua aún después de la colocación y endurecimiento de la mezcla y continua hasta que la concentración se reduce y la reacción cesa; y por último, a bajo contenido de agregado reactivo la reacción continua hasta que todo el agregado reacciona.⁽¹⁹⁾

Vivian, que fue de los primeros en estudiar este fenómeno, adicionalmente mencionó que cuando se aumenta la cantidad de agregado reactivo se disminuye la disponibilidad de álcalis por unidad de área de agregado, la disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la mezcla permanece constante. Este cambio en la razón de disponibilidad álcali-cal en el sitio de la reacción produce un beneficio tanto mayor (formación de menor cantidad de material deletéreo), mientras mayor sea la concentración de agregado reactivo.

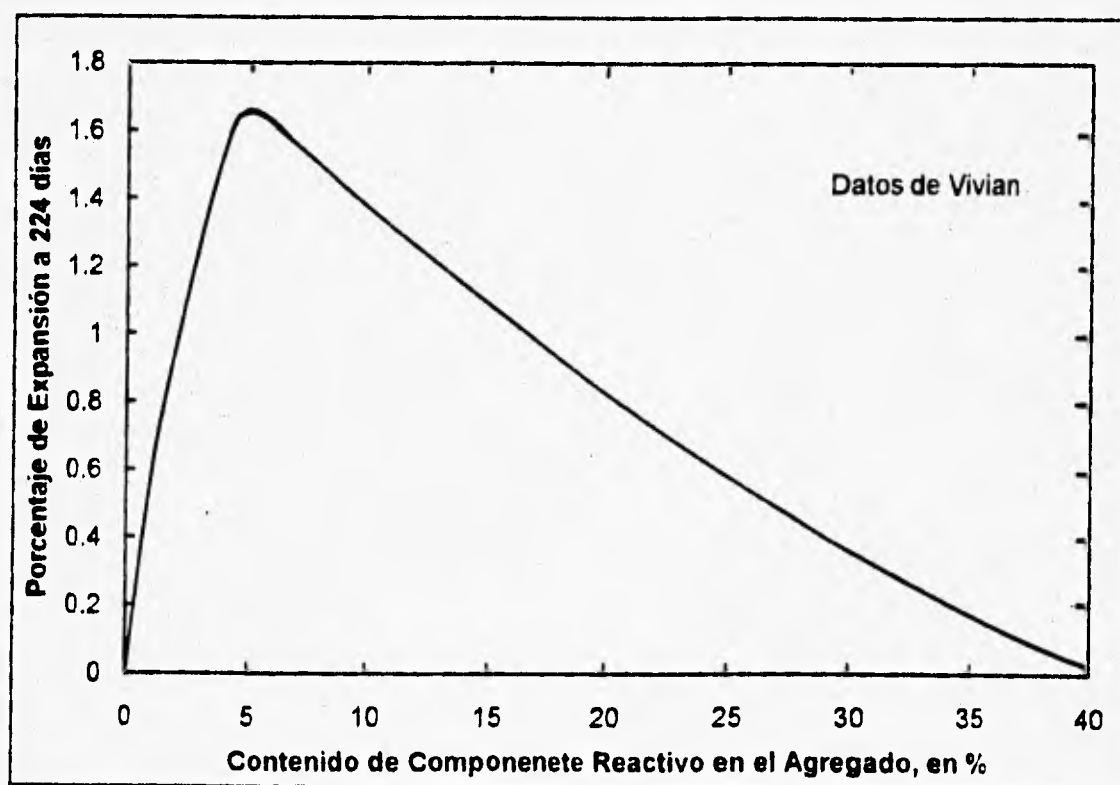


Fig. 4. Resultados obtenidos por Vivian al variar el contenido de material reactivo en barras de mortero (figura tomada de la referencia 2)

La determinación del contenido pésimo de material reactivo no es sencilla, pues varía con respecto al agregado, puede ser el 3, 5, 10, 20 y en algunos casos hasta el 100 %. Esta variación se da por las mismas características del agregado; así por ejemplo, cuando se utilizan agregados muy porosos las expansiones tienden a disminuir, esto ocurre tal vez porque el producto de la reacción trata de llenar los poros de los agregados y las presiones en el concreto disminuyen.⁽²⁰⁾ La influencia del tamaño de la partícula sobre los efectos de la reacción ha sido muy discutida. A menudo se dice que puede esperarse mayor expansión de las partículas con tamaño de arena, que de las partículas muy finas o muy gruesas. Esta consideración se basa en el hecho de que las partículas muy finas, reaccionan rápidamente con los álcalis y la reacción álcali-cal en el lugar de la reacción se reduce creándose un producto no deletéreo, como se mencionó con anterioridad, y reduciéndose la concentración de álcalis a niveles inofensivos. Por otro lado, la reacción de las partículas demasiado grandes (como las gravas) crea un producto deletéreo debido a la alta relación álcali-cal en el lugar de la reacción, pero la evolución de la expansión es muy lenta, lo que ocasiona que sus efectos se manifiesten después.⁽⁹⁾

También se ha dicho que una concentración baja de álcalis en el concreto podría convertirse en un medio favorable para que ocurra una expansión deletérea a largo plazo cuando se utilizan agregados gruesos reactivos o arenas reactivas con escasos finos. Por otra parte, los resultados de algunas investigaciones han demostrado que en la arena, para determinada proporción de sílice reactiva, la expansión aumenta al decrecer el tamaño de las partículas.

Es por lo anterior, que realmente resulta difícil predecir cuál será la influencia del tamaño y granulometría de los agregados en los efectos de la reacción álcali-sílice, aunque algunas de las afirmaciones anteriores han servido para explicar el por qué de la eficiencia de algunas puzolanas para inhibir la reacción.

En el caso de la reacción álcali-sílice, las puzolanas han demostrado mucha eficiencia para inhibirla cuando se incorporan al concreto en proporción conveniente. La explicación que se ha dado a este fenómeno es que al estar las puzolanas constituidas por partículas de sílice muy finas, éstas reaccionan rápidamente con los álcalis y en consecuencia limitan los álcalis disponibles para reaccionar con los agregados. En la reacción de los álcalis con la sílice de las puzolanas se producen geles sílico-alcálicos de baja solubilidad, que no se expanden, evitándose de esta manera que se generen presiones sobre la pasta de cemento y el consecuente deterioro del concreto.

Sin embargo, al adicionar un material puzolánico al concreto, es necesario no olvidarse de los siguientes puntos:⁽⁸⁾

1. Que los álcalis aportados por la puzolana no alcancen a crear una concentración riesgosa en el concreto.
2. Que la cantidad de sílice reactiva adicionada al concreto, sea en realidad suficiente para rebasar la proporción que en tal caso sea pésima.

El descuido en cualquiera de los dos puntos señalados anteriormente podría provocar efectos adversos al problema que se intenta solucionar, pues podría suceder que al incorporar sílice a la masa de concreto se cayera en el intervalo pésimo de contenido de material reactivo, creando con ello condiciones para que se presenten expansiones con efectos deletéreos.

La efectividad de las puzolanas para inhibir las expansiones provocadas por la reacción álcali-sílice se verifica mediante el método de prueba estandarizado en la ASTM bajo la especificación C 441 (Método de prueba para la efectividad de aditivos minerales en la prevención de expansiones excesivas del concreto debidas a la reacción álcali-agregado).

Otra reacción del tipo álcali-agregado, que como se mencionó en el apartado anterior, se asocia a la reacción álcali-sílice, es la reacción de expansión tardía álcali-silicato/sílice. Esta reacción es señalada por los canadienses como una reacción que ocurre entre los álcalis de la solución de poro del concreto y algunas rocas sílicas que contienen cuarzo microcristalino.⁽³⁾

Se cree que la característica lenta y tardía de esta reacción se debe a que los iones hidróxilo atacan o se precipitan preferentemente con algunas partes mal formadas de la estructura de las formas de sílice y que son fáciles de destruir. Las otras partes bien formadas de la estructura resisten más el ataque de los iones. Es por eso que la cantidad de producto de la reacción es pequeña a edades tempranas y sólo se puede incrementar para causar efectos deletéreos al paso de un largo período de tiempo.

Esta reacción ha sido de particular interés, pues la mayoría de las rocas que fueron inicialmente asociadas a una reacción álcali-silicato han sido reagrupadas en ella. Sin embargo, la existencia de las reacciones álcali-silicato no ha sido descartada y se ha observado que se presenta en rocas tales como las grauacas, filitas y argilitas, cuyos componentes minerales son: 1) cuarzo de grano fino y 2) aluminio y hierro hidratado precipitado en el espacio entre capas de las rejillas de minerales arcillosos.

Los estudios hechos sobre la reacción álcali-silicato sugieren que las expansiones del concreto se deben a las expansiones provocadas por el hinchamiento de los minerales arcillosos contenidos en las partículas de agregados. Esto es posible debido a que los iones hidróxilo de la solución de poro podrían remover los precipitados entre capas y permitir el aumento de volumen de los minerales arcillosos debido a la absorción de agua, induciendo expansiones y agrietamiento de los agregados y la pasta de cemento que los rodea.

Algunos autores han señalado que el mecanismo descrito en el párrafo anterior no es capaz de provocar presiones que agrieten al concreto y proponen que el agrietamiento se debe más a una reacción del tipo álcali-sílice. Sin embargo en la aplicación del método de prueba ASTM C 586 (Método de los cilindros de roca, ocupado para determinar la potencialidad deletérea de agregados susceptibles a una reacción álcali-carbonato) a

tipos de roca susceptibles a una reacción álcali-silicato se observaron expansiones significantes; mientras que muchas rocas susceptibles a una reacción álcali-silice simplemente se hubieran disuelto en la solución ocupada en el método (NaOH).⁽³⁾

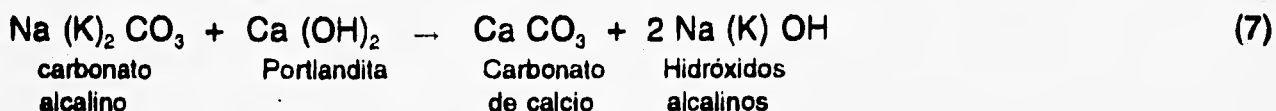
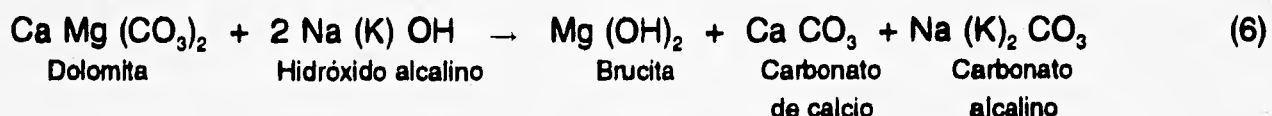
Esto podría confirmar entonces que, la exfoliación debida al hinchamiento de los minerales arcillosos de las rocas susceptibles a la reacción álcali-silicato, puede contribuir en el mecanismo de expansión y agrietamiento de estructuras dañadas por esta reacción.

2. Reacción álcali-carbonato.

La reacción álcali-carbonato es una reacción química entre los hidróxidos alcalinos de la solución de poro del concreto y ciertas rocas calizas dolomíticas arcillosas. Se caracteriza por presentarse en forma rápida, generalmente dentro de los primeros cinco años de servicio de las estructuras de concreto. Origina expansiones excesivas y un extenso agrietamiento.

Una roca típica que induce una reacción del tipo álcali-carbonato está constituida por rombos de dolomita, generalmente menores de 50 μm , que se encuentran diseminados en una matriz de calcita microcristalina (micrita) y minerales arcillosos (illita).

La mayoría de los autores coinciden en señalar que el primer paso del mecanismo de expansión de este tipo de reacción consiste en una destrucción progresiva de los rombos de dolomita diseminados en la matriz de calcita microcristalina y materiales arcillosos de la roca. A esta destrucción se le conoce como "proceso de dedolomitización" y puede ser descrita como sigue:



En el proceso de dedolomitización se presenta un decremento en la relación dolomita/calcita.

En un principio se creyó que el proceso de dedolomitización por sí mismo, con la formación de brucita y carbonato de calcio, podría ser responsable de las expansiones observadas. Sin embargo, estudios posteriores indicaron que el volumen ocupado por los productos de la dedolomitización es menor que el de la dolomita reactiva, y por lo tanto no podría haber expansión. Un segundo mecanismo fue propuesto por Swenson y Gillot

(1964) donde se exponía que presiones suficientemente grandes para agrietar el concreto podían inducirse por la absorción de los iones alcalinos y moléculas de agua asociadas, de las superficies activas de minerales arcillosos diseminados en los rombos dolomíticos. El proceso de dedolomitización se consideró entonces como un prerequisite, para que a través de él se abrieran canales a través de los cuales los álcalis pudieran entrar y reaccionar con los minerales arcillosos. Sin embargo, Grattan-Bellew y Lefebvre (1987) reportaron que en especímenes que se habían expandido y agrietado debido a una reacción álcali-carbonato no se había encontrado evidencia de dedolomitización, esto hizo suponer que tal proceso no es prerequisite para que ocurra la reacción.^(3 y 16)

Tang et al. propusieron recientemente (1987) un modelo que describe el mecanismo de expansión de la reacción álcali-carbonato. Este modelo se basó en la observación de partículas de roca que habían sufrido expansiones después de seis meses de inmersión en una solución alcalina.

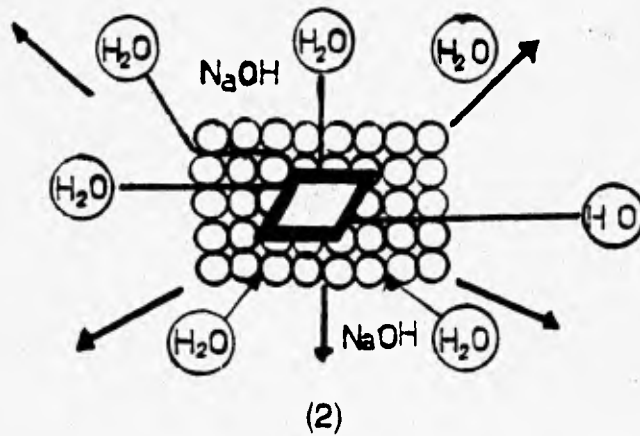
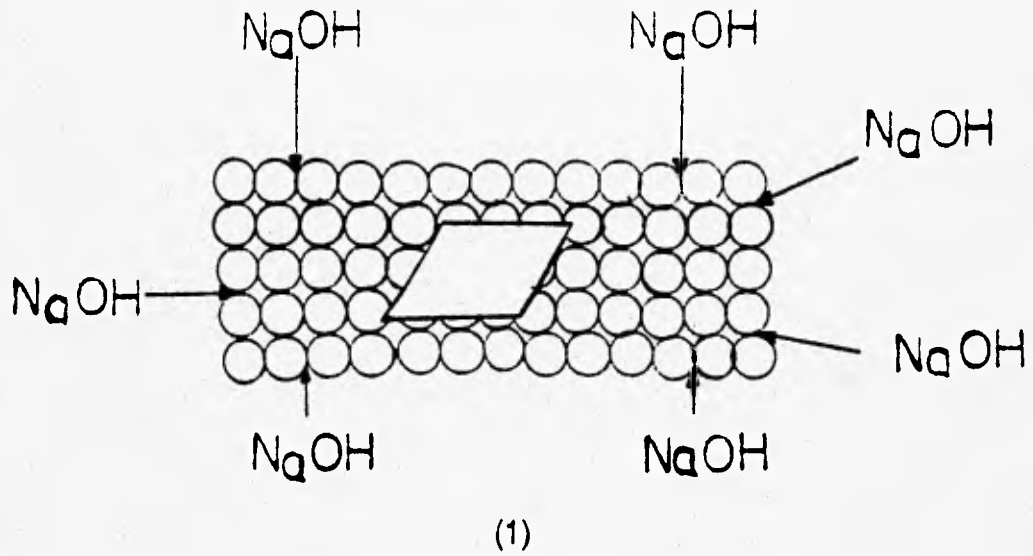
El modelo sugiere que las fuerzas de expansión son generadas por: 1) las presiones hidráulicas causadas por la migración de iones y moléculas de agua dentro de espacios restringidos, y 2) las presiones de cristalización de las fibras de brucita, las cuales se desarrollan perpendicularmente a la superficie de los rombos dolomíticos.^(3 y 16)

Otra teoría, la de Grattan-Bellew et al., propuesta en 1989 sugiere que existen dos estados identificables en el mecanismo de expansión, estos son:

1) En la partícula caliza reactiva, los rombos de dolomita se encuentran incrustados en una matriz de calcita microcristalina y minerales arcillosos. Esta matriz, forma redes que posteriormente permiten la penetración de los iones hidróxido de la solución de poro que reaccionan con los rombos dolomíticos.

2) El proceso de dedolomitización continúa y se forma un borde de brucita al rededor del rombo dolomítico. Las moléculas de agua penetran la partícula de roca y llenan los espacios entre los cristales de brucita causando una presión de expansión. El crecimiento de la brucita puede generar también fuerzas expansivas.^(3 y 16)

Esta es una de las teorías más recientes que tratan de explicar el mecanismo de reacción-expansión de la reacción álcali-carbonato. En la figura 5 se hace una representación esquemática de la misma.



SIMBOLOGIA

Rombo de dolomita rodeado de brucita



Molécula de agua



Cristales de calcita



Presiones de expansión



Alcalis, NaOH, KOH

NaOH

Fig. 5. Representación esquemática del modelo propuesto por Grattan-Bellew para la reacción álcali-carbonato

Todas estas teorías han contribuido a diferenciar tres fases, que en la actualidad son conocidas como principales en el proceso de expansión cuando ocurre una reacción álcali-carbonato, y son:

1. Proceso de dedolomitización. Existe una dedolomitización de los agregados (rocas calizas dolomíticas arcillosas) provocada por el contacto de la dolomita con los álcalis de la solución de poro y evidenciada por la formación de brucita. Este proceso genera fuerzas expansivas que contribuyen al agrietamiento del concreto.

2. Absorción de humedad. Las superficies de los minerales arcillosos diseminados en los rombos dolomíticos comienzan a absorber moléculas de agua o iones alcalinos de la solución de poro.

3. Expansión. Se generan fuerzas expansivas que rompen la partícula de agregado y de seguir llegan a agrietar el concreto. Estas fuerzas provienen de:

a) Presiones hidráulicas provocadas por el movimiento de las moléculas de agua y la migración de los iones.

b) Presiones de cristalización de las fibras de brucita.

Es muy importante señalar, sin embargo, que el mecanismo exacto que genera las fuerzas expansivas es aún desconocido.

Un aspecto muy importante dentro de la reacción álcali-carbonato es que la reacción de los carbonatos alcalinos $[\text{Na (K)}_2 \text{CO}_3]$ con portlandita de la pasta de cemento regenera hidróxidos alcalinos dentro de la solución de poro (ver la ecuación 7). Esto podría significar que el mecanismo reacción-expansión podría continuar indefinidamente, y puede también explicar por qué cementos con bajo contenido de álcalis han demostrado ser ineficientes para prevenir expansiones y agrietamientos debidos a la reacción álcali-carbonato. La rapidez con que se presentan los efectos encuentra explicación también en este sentido.

Por otra parte, las observaciones hechas en cuanto al "contenido pésimo de material reactivo de los agregados" señalado en la reacción álcali-sílice no son aplicables para las rocas o materiales que inducen una reacción álcali-carbonato, pues se observa cierta tendencia a la proporcionalidad entre el contenido de rocas carbonatadas reactivas en los agregados y las expansiones que se registran en el concreto. Se ha señalado también que los efectos deletéreos en esta reacción son proporcionales al diámetro de la partícula cuando se utilizan agregados reactivos.

Por tanto, las recomendaciones que se hacen cuando se tienen que utilizar agregados susceptibles a este tipo de reacción álcali-agregado, son las siguientes:⁽⁷⁾

1. Utilizar gravas con el menor tamaño máximo nominal que resulte posible.

2. Limitar a un máximo de 20 por ciento el contenido de rocas potencialmente reactivas en la grava o en la arena, individualmente; o un máximo de 15 por ciento en el agregado total si ambos agregados son potencialmente reactivos. Para lograrlo, se puede seguir una explotación selectiva de las canteras y/o mezclando en proporciones adecuadas agregados reactivos con inocuos.

3. Emplear un cemento con muy bajo contenido de álcalis (0.40 por ciento como Na_2O y cuando no sea posible a lo más 0.6 por ciento).

4. Emplear una puzolana que haya demostrado ser eficaz para inhibir la reacción álcali-carbonato. Es importante señalar que las puzolanas que son efectivas para inhibir la reacción álcali-sílice no siempre son efectivas para inhibir la reacción álcali-carbonato.

5. Proteger al concreto contra el acceso o los cambios de humedad.

Por último, se presentan unos cuadros sinópticos útiles en el proceso de verificación del grado de reactividad de agregados que se pretendan utilizar en la elaboración de concreto. Los cuadros incluyen sugerencias desde la identificación de la fuente hasta las medidas que se adoptan cuando se cuenta con agregado reactivo.

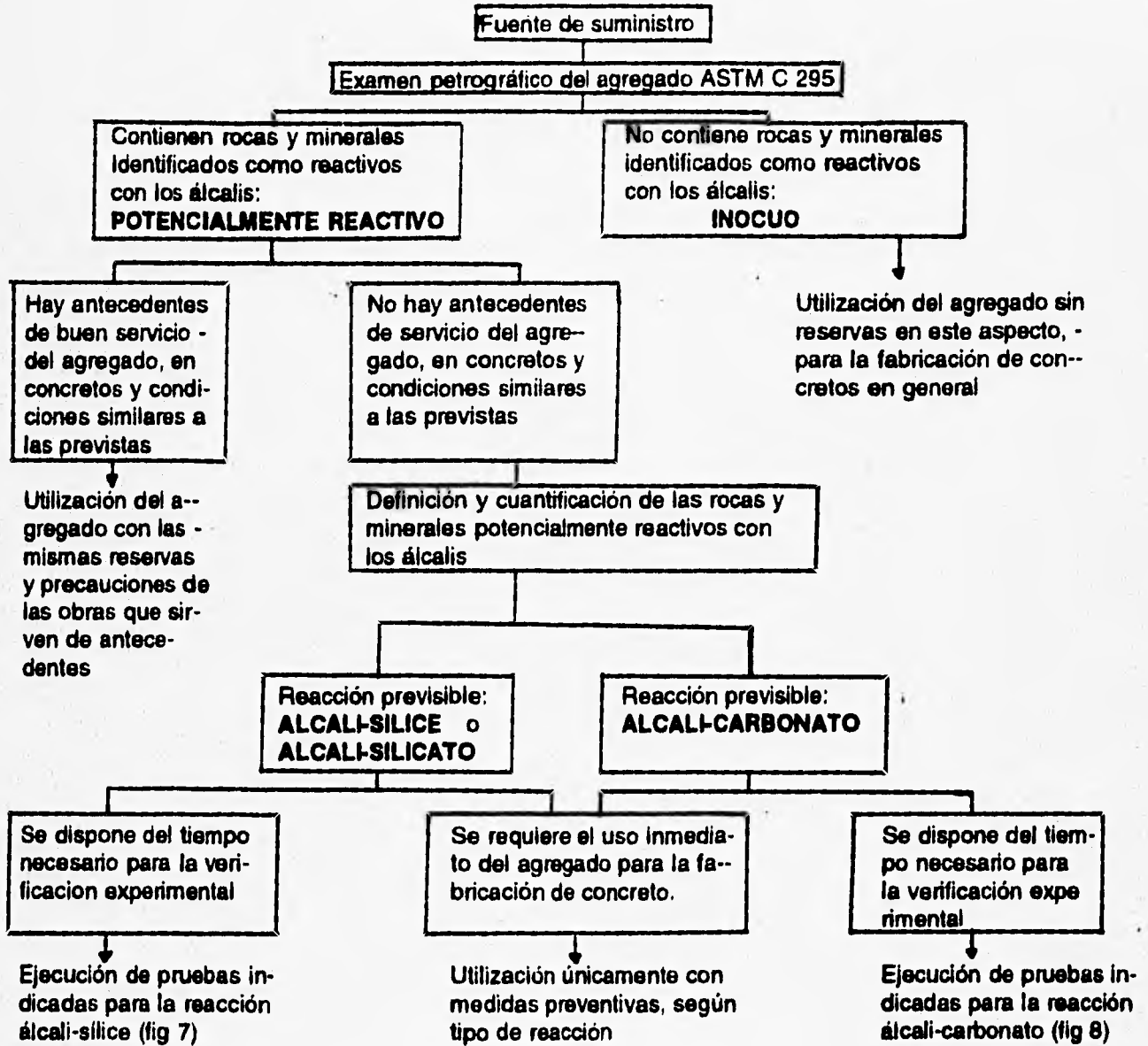


Fig. 6. Acciones y decisiones iniciales en el proceso de identificación y verificación del carácter reactivo de los agregados con los álcalis de concreto. (tomada de la referencia 7)

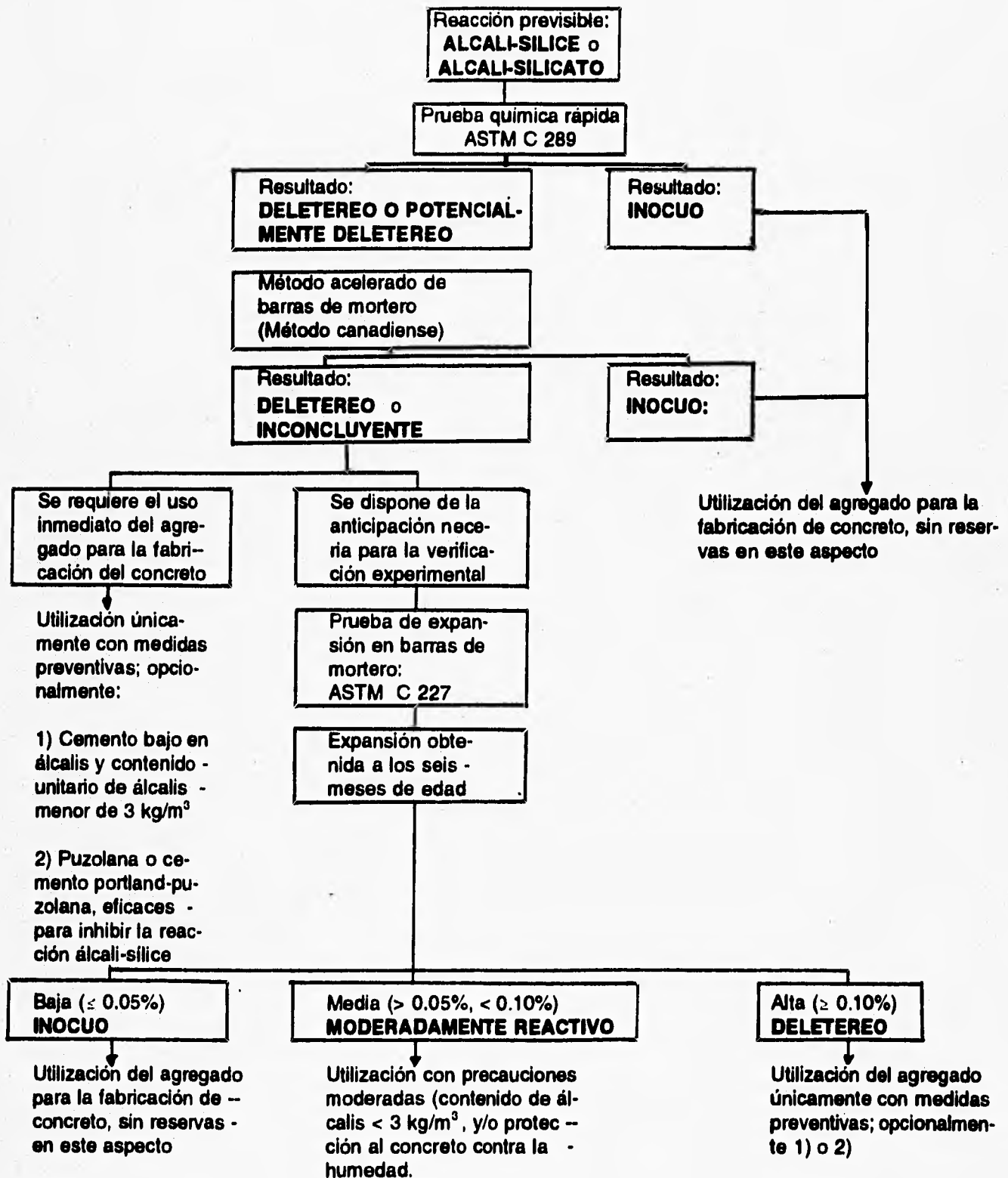


Fig. 7. Pruebas iniciales para verificar la reacción álcali-silice (adaptada de la referencia 7)

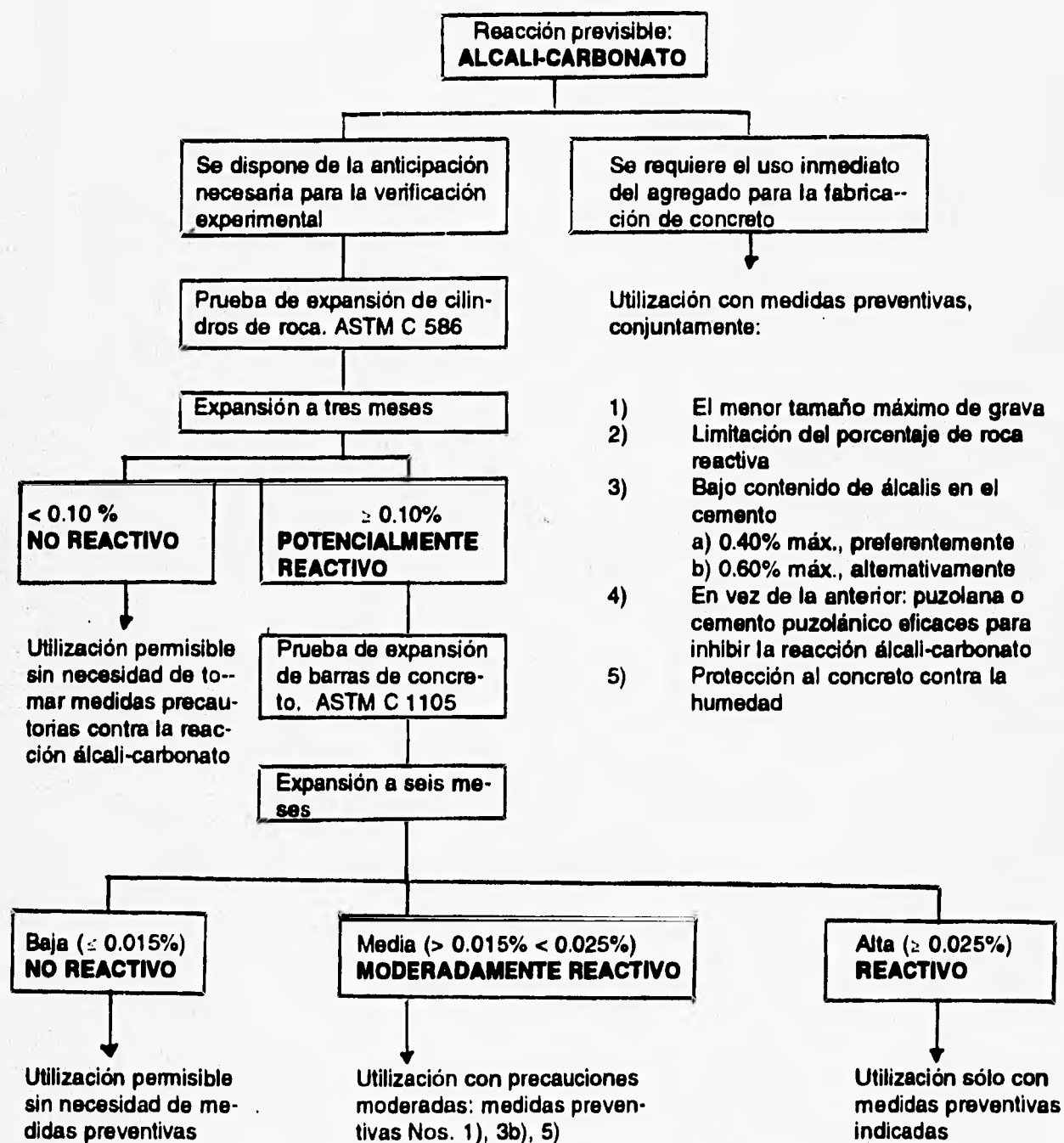


Fig. 8. Pruebas iniciales para verificar la reacción álcali-carbonato (tomado de la referencia 7)

II. CEMENTOS Y AGREGADOS UTILIZADOS EN EL AREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO

El concreto hidráulico es una mezcla de agregados, cemento portland, agua, aire y en algunos casos aditivos que al endurecer forma una masa de características similares a la de una roca. Por su versatilidad, durabilidad y economía, el concreto se ha convertido en el material de construcción más utilizado en el mundo.

En el Distrito Federal y su área metropolitana la utilización del concreto en construcción es muy común. Se le utiliza tanto en pequeñas obras como en obras de gran magnitud tales como edificios, puentes, pavimentos, túneles, etc. Su fabricación puede hacerse en obra o en planta premezcladora, en donde los materiales son dosificados, y mezclados para después enviarse a las obras.

En este capítulo se trata de hacer un análisis de las características y fuentes de abastecimiento de dos de los principales componentes de los concretos que se elaboran en el Distrito Federal y su área metropolitana: los agregados y los cementos.

A. Agregados

Los agregados ocupan comunmente del 60 al 75% del volumen total del concreto (70% a 85% en peso), es por ello que su selección y empleo influyen notablemente en las características del concreto fresco y endurecido así como en la economía de su fabricación. Los agregados por su tamaño se dividen en gruesos y finos, para diferenciarlos se utiliza la malla No. 4 (4.75 mm). Las partículas que son retenidas en esta malla se consideran agregados gruesos o gravas y aquellas que pasan reciben el nombre de agregados finos o arenas.

Las fuentes de donde pueden obtenerse los agregados para concreto son de dos tipos: las fuentes naturales y las fuentes de agregados manufacturados o triturados. En las fuentes naturales, los agregados sólo son removidos del depósito donde se encuentran, reciben un pequeño tratamiento (lavado, cribado etc.) que en algunos casos es innecesario y se encuentran listos para utilizarse; ejemplos de este tipo de fuentes son los lechos de ríos, lagos, lechos marinos y excavaciones en cerros, también llamadas

minas de arena y grava. En las fuentes de agregados manufacturados o triturados, el agregado se produce triturando roca de cantera, piedra bola, guijarros, o grava de gran tamaño; la escoria de alto horno enfriada al aire y triturada y el concreto reciclado o concreto de desperdicio triturado son también fuentes de agregado manufacturado.

Todas las características que deben cumplir los agregados para que puedan utilizarse y obtener un concreto de buena calidad se encuentran establecidas en diferentes especificaciones y métodos de prueba. En el Distrito Federal existen laboratorios en donde se puede verificar la calidad de los agregados basados en las normas, pero claro, esto sólo sucede en obras de gran magnitud pues en obras pequeñas muchas veces la calidad es pasada por alto.

A continuación se señalan las principales fuentes de suministro de agregados de la región, así como algunas características físicas de los agregados que han sido seleccionados para estudiar su reactividad.

1. Ubicación de bancos.

El Distrito federal y demás entidades que lo circundan pertenecen o se encuentran localizados en el denominado eje neovolcánico. En él, se tienen rocas volcánicas vítreas y sus tobas (riolitas, dacitas, andesitas y algunos basaltos), estas rocas se caracterizan por tener un alto contenido de sílice que puede ser deletérea al combinarse con los álcalis del cemento portland.^(21 y 22)

Por otra parte, las rocas calizas que se encuentran dentro de esta región contienen poco o nada de material calcáreo dolomítico, identificado como susceptible a participar en la reacción álcali-carbonato. Por tanto, el riesgo de que se presente una reacción álcali-sílice en esta región es mayor al de una reacción álcali-carbonato.

Hasta hace apenas unos años, el Distrito Federal era abastecido de agregados para concreto de tres zonas: la zona norte, con bancos del estado de Hidalgo y algunas entidades colindantes del estado de México como Apasco y Zumpango; la zona suroeste, con bancos de Santa Fe, Huixquilucan, y Cuajimalpa y la zona oriente con bancos de Los Reyes La Paz, Texcoco, y los situados a un costado de la carretera federal a Puebla. Actualmente, la zona suroeste se encuentra prácticamente agotada y los agregados son traídos en su mayoría de la zona oriente pues los bancos de la zona norte se encuentran lejanos.

El mapa de la figura 9 muestra la distribución actual de los bancos de agregados. Son en total 47 bancos los que se están explotando. Nueve son de la zona norte, treinta y cuatro de la zona oriente y solamente 4 de la zona suroeste. De todos ellos solamente 17 fueron muestreados para este estudio y se seleccionaron 6 para aplicarles los métodos de prueba para reactividad álcali- agregado.

Los seis bancos escogidos fueron seleccionados tratando de que fueran representativos del material de la zona en que se encuentran. De ellos, cuatro son de la zona oriente, uno de la zona suroeste y el último de la zona norte.

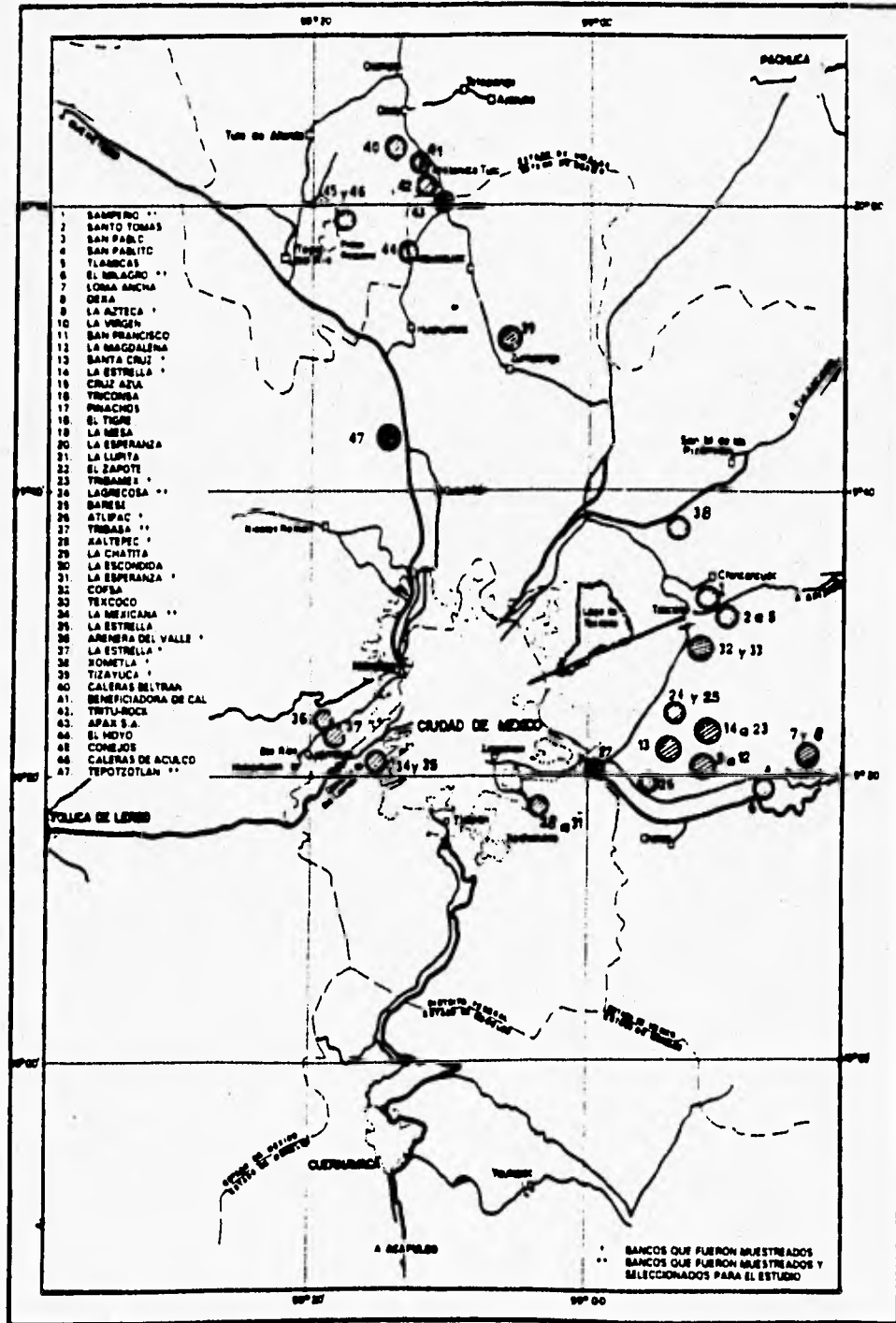


Fig. 9. Bancos de agregados existentes en el Distrito Federal y su área metropolitana.

2. Caracterización física.

A continuación se hace mención de algunas de las características físicas de los bancos seleccionados para el estudio.

Tribasa. El banco tribasa se encuentra en la zona oriente. En esta zona predominan las brechas andesíticas pero éste es un basalto masivo de color gris oscuro.

El banco actualmente se encuentra en explotación para la producción de grava y arena por medio de trituración. La arena presenta gran cantidad de partículas planas y alargadas.

El basalto de este banco es representativo de los basaltos masivos existentes en la zona oriente, aunque realmente el basalto masivo en esta zona es poco explotado en comparación con las andesitas existentes (No debe entenderse con esto que el basalto masivo es poco explotado en volumen, sólo se hace la comparación con las andesitas). Otro tipo de basalto que se puede encontrar en el oriente del Distrito Federal es el basalto vesicular aunque éste tiene utilización muy limitada en el concreto hidráulico.

El Milagro. Este banco también se encuentra ubicado dentro de la zona oriente. Los agregados producidos aquí son de origen natural, es decir no son triturados. Produce grava y arena. El material es una brecha andesítica de color azul y presenta un exceso de finos. Presenta buena apariencia para utilizarse en concreto.

Lagrecosa. Esta es una arena de origen aluvial con granos de andesita, basalto mica y cuarzo. Es de color gris y presenta algunas partículas mayores que la malla No. 4 que se pueden utilizar como grava. El banco pertenece también a la zona oriente.

Samperlo. El material de este banco es una brecha andesítica de color azul. En él se producen grava y arena que presentan buena apariencia para utilizarse en concreto. Se encuentra ubicado también en la zona oriente aunque un poco más al norte que los dos anteriores.

Con estos cuatro bancos es posible caracterizar a los materiales de la zona oriente ya que los bancos cercanos a los mencionados presentan características muy similares a las descritas de cada uno de ellos.

La Mexicana. Este material es una brecha andesítica de color azul (grava y arena), presenta un alto contenido de finos, pero la forma y apariencia de las partículas lo hacen verse bien para utilizarse en concreto. Este es uno de los únicos dos bancos que se encuentran en explotación en el suroeste de la ciudad. Durante muchos años, aunado a los bancos ya desaparecidos de esta zona, ha producido agregados para concretos de la ciudad de México.

Tepetzotlán. Este es uno de los bancos de la zona norte que se encuentra mas cercano al Distrito Federal. A diferencia de las calizas predominantes en esta zona, Tepetzotlán es un banco de basalto masivo color gris. Los agregados producidos aquí son triturados para utilizarse en concreto. Fue escogido porque, como se mencionó al principio de este capítulo, se ha observado que las calizas existentes en la zona del eje neovolcánico no son tan susceptibles a sufrir la reacción álcali-agregado, observación que lamentablemente no puede ser aplicable también a los basaltos.

Estas son pues algunas de las características físicas de los bancos seleccionados para este estudio y que han sido considerados como representativos de las tres zonas de abasto de agregados para la región estudiada. Para los fines de métodos de prueba se hizo necesaria la obtención de dos características físicas específicas: la densidad y la absorción de los agregados. Estas se presentan en la siguiente tabla.

BANCO	MATERIAL	DENSIDAD (gm/cm ³)	ABSORCION (%)
TRIBASA	BASALTO	2.63	1.7
EL MILAGRO	ANDESITA	2.46	3.1
LAGRECOSA	ANDESITA	2.50	2.8
SAMPERIO	ANDESITA	2.51	3.2
LA MEXICANA	ANDESITA	2.45	4.1
TEPOTZOTLAN	BASALTO	2.45	4.4

Tabla 4. Densidad y absorción de los materiales integrados (60% de grava y 40 % de arena) utilizados en los métodos de barras de mortero.

Las dos características físicas fueron determinadas del material integrado que se ocuparía en los métodos de prueba y no de las muestras tomadas en los bancos. Los procedimientos para obtenerlas se encuentran estandarizados en la norma ASTM C 128.

B. Cementos.

El cemento Portland es un material proveniente de la pulverización fina del producto obtenido por calcinación y fusión incipiente de una mezcla íntima y debidamente proporcionada de materiales arcillosos y calizas, sin más adición posterior a la calcinación que yeso natural, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con otros materiales como arena, grava, asbesto, suelo, etc., tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida.^(23 y 24)

El uso de materiales cementantes se remonta hasta la antigüedad. Los egipcios, griegos y romanos utilizaron materiales de cementación en sus obras que han sobrevivido

hasta nuestros días aún duros y firmes. En la edad media hubo una disminución general en la calidad y el uso del cemento, y solamente en el siglo XVII se encuentra un adelanto en el conocimiento de los cementos. En 1756, John Smeaton, un ingeniero inglés, descubrió que cuando se calcinaba una caliza suave impura que contenía cierta proporción de arcilla, podía endurecer bajo el agua, así como en el aire en una masa sólida.

En 1796, Joseph Parker, de Inglaterra, calcinó ciertas piedras o productos arcillosos llamados "nódulos de arcilla" en un horno de cal ordinario y molió el producto resultante. A este cemento se le llamó cemento romano ya que su color era muy parecido al de los viejos cementos romanos.

En 1810 Edgar Dobbs, de Inglaterra también, produjo un cemento de caliza y arcilla. En 1823, Vicat de Francia y, en 1822, James Frost en Inglaterra, comenzaron a hacer cementos de caliza y arcilla.

Sin embargo, no fue sino hasta 1824 que se produjo un cemento perfeccionado. Joseph Aspdin, un albañil inglés, adquirió una patente en Inglaterra para elaborar un cemento producido por el calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla moliendo el producto resultante hasta convertirlo en un polvo fino. A este polvo le dio el nombre de "Cemento Portland", por la similitud que tenía ese cemento endurecido con ciertas canteras de piedra de la Isla de Portland, Inglaterra.

Los primeros trabajos para fabricar cemento portland en Inglaterra fueron establecidos por James Frost en 1825. Las primeras plantas establecidas fuera de Inglaterra se hicieron en Bélgica y Alemania en 1855. en Estados Unidos comenzó a fabricarse cemento portland en 1875 y en México a principios del siglo XX (en 1906).

Las materias primas fundamentales para la fabricación del cemento tal y como lo conocemos en nuestros días son: la caliza o marga y los materiales arcillosos como el barro o pizarra. Estos materiales son combinados a elevadas temperaturas y forman los compuestos que constituyen el cemento portland. Existen otras materias primas que pueden agregársele dependiendo del uso que vaya a hacerse de él, éstas son: material férrico, hematita o escoria rica en óxido de fierro, material silicoso, cuarzo, arena, cenizas y escorias con alto contenido de silice. Los cementos con estas materias primas adicionales se ocupan en construcciones especiales como: grandes masas de concreto, obras hidráulicas y marítimas, o para obras con alta resistencia a los sulfatos.

El yeso es otra materia prima fundamental para obtener un buen cemento. Este material sirve para controlar el fraguado.

Ya que las materias primas son seleccionadas, éstas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Existen dos procesos para la realización de estos trabajos: el proceso seco y el proceso húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos.

En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada. En otros aspectos, los procesos seco y húmedo son muy similares.

Cuando se termina el mezclado, la materia prima molida se deposita en el extremo superior de un horno rotatorio y se hace pasar por él a una velocidad que es controlada por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del mismo. Las temperaturas del horno varían de 1420°C a 1650°C y éstas hacen que la materia prima se transforme químicamente en clínker de cemento, que tiene la forma de pequeñas esferas negro-grisáceas de aproximadamente 12 mm de diámetro.

El clínker se pone a enfriar y posteriormente se pulveriza, y es aquí precisamente (en la pulverización) donde se agrega el yeso que como se mencionó anteriormente sirve para controlar el fraguado del cemento. El clínker es molido tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200. Es a este polvo gris a lo que se llama cemento portland.

1. Tipos disponibles.

Para satisfacer diferentes necesidades físicas y químicas se fabrican diversos tipos de cemento portland. La norma ASTM C 150 estipula ocho tipos de cemento portland:

Tipo I Normal

Tipo IA Normal, inclusor de aire

Tipo II De resistencia moderada a los sulfatos

Tipo IIA De resistencia moderada a los sulfatos, inclusor de aire

Tipo III De alta resistencia a edad temprana

Tipo IIIA De alta resistencia a edad temprana, inclusor de aire

Tipo IV De bajo calor de hidratación

Tipo V De alta resistencia a los sulfatos.

Sin embargo como una forma de conservación de la energía se desarrollaron materiales secundarios en el concreto de cemento portland. Así, se crearon cementos hidráulicos mezclados que se producen al mezclar de manera íntima y uniforme dos tipos de materiales finos. Los principales materiales de mezclado son el cemento portland, escoria de alto horno molidas, cenizas volantes y otras puzolanas, cal hidratada y

combinaciones previamente mezcladas de cemento con estos materiales.⁽²⁵⁾ En la norma ASTM C 595 se establecen los requisitos que deben cumplir los cementos mezclados, así mismo reconoce cinco tipos de los mismos, estos son:

Tipo IS	Cemento portland de escoria de alto horno
Tipo IP y	
Tipo P.	Cemento portland-puzolana
Tipo S	Cemento de escoria
Tipo I (PM)	Cemento portland modificado con puzolana
Tipo I (SM)	Cemento portland modificado con escoria

De todos los mencionados anteriormente, en México sólo se fabrican el tipo I, II, IS, IP y cemento para albañilería, cuyos requisitos para fabricación se encuentran establecidos en la norma ASTM C 91 (los tipos III, IV y V se fabrican bajo pedido).

Al Distrito Federal y su Area Metropolitana, por el tipo de construcciones, sólo se surte el cemento tipo I y el cemento portland puzolánico, y cuando se necesita satisfacer alguna necesidad específica sus características se modifican agregando alguno o varios de los aditivos químicos que existen en el mercado.

2. Caracterización química.

La combinación química de las materias primas durante el proceso de calcinación en los hornos hace que se formen varios compuestos. Alrededor del 90% en peso del cemento está constituido por cuatro compuestos principales, éstos son:

Silicato tricálcico	C_3S
Silicato dicálcico	C_2S
Aluminato tricálcico	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	C_4AF

El resto del peso del cemento lo forman otros constituyentes como el yeso, agregado en la molienda final del clinker, y otros que quedan libres durante la calcinación de las materias primas, es decir, elementos que no se alcanzan a combinar en los hornos, tales como la cal libre, la magnesia, los álcalis, etc.

"Los silicatos son responsables del desarrollo de resistencias del cemento. El silicato tricálcico (C_3S) es el mayor contribuyente en las resistencias a todas las edades, principalmente de las resistencias a edades tempranas hasta los 28 días de curado. A edades mayores el silicato dicálcico (C_2S) es el que juega el papel más importante, siendo responsable de las resistencias a períodos de un año o más. El aluminato tricálcico (C_3A) contribuye muy poco en la resistencia, en cambio genera mucho más calor que una cantidad igual de los otros componentes y es responsable de la variación del volumen del concreto, de la formación de grietas, y es el más vulnerable al ataque de los sulfatos, cuando el concreto se encuentra en contacto con aguas o suelos sulfatados.

En orden de generación de calor al C_3A le siguen el C_3S , C_4AF y finalmente el C_2S . El ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) contribuye poco o nada a la resistencia".⁽²³⁾

Los componentes secundarios del cemento portland tienen influencia también sobre el comportamiento del cemento. La cal libre u óxido de calcio, que queda en exceso por cocción insuficiente del clinker, puede dar lugar a dilatación y agrietamiento de la pasta de cemento o concreto. De acuerdo con la experiencia se ha encontrado que un cemento con un valor en su cal libre superior a 2% corre el riesgo de sufrir fuertes expansiones.

El óxido de magnesio, también llamado magnesia puede también provocar un aumento de volumen del cemento, pero este, a diferencia de la cal se produce en forma retardada, incluso después de varios años. Las normas limitan su contenido a un máximo de 4%.

Los álcalis, óxidos de sodio y potasio son limitados a 0.60% (expresado como óxido de sodio) como ya se ha mencionado anteriormente en el Capítulo I. El "residuo insoluble", es una pequeña fracción del cemento formada por una mezcla de óxidos no solubles en ácido clorhídrico, los cuales no intervienen en las propiedades del cemento, pero por constituir una impureza, se limita su contenido a 0.75% como máximo.

La "pérdida por ignición" o "pérdida por calcinación", representa el porcentaje de pérdida de peso que sufre el cemento después de someterlo a un calentamiento de 1000°C. Las sustancias que se pierden a esta temperatura son: agua y bióxido de carbono. Este concepto es una medida de la edad del cemento y en México se limita su contenido a un 3% como máximo.

Podrá observarse que para tener un cemento de buena calidad que satisfaga las necesidades del estudio es muy importante la supervisión de cada uno de sus componentes. Esto se puede hacer mediante análisis químico de los cementos.

Para este estudio se seleccionaron diez muestras de cementos de los que circulan en el mercado.

Todas fueron analizadas químicamente y se escogieron finalmente tres para ser combinadas con los agregados previamente seleccionados.

El criterio para escoger los cementos para el estudio fue el contenido de álcalis. El primero fue un cemento con alto contenido de álcalis, el segundo con bajo contenido de álcalis y finalmente un tercero con alto contenido de álcalis pero con puzolana para poder analizar qué tan efectiva era la puzolana para inhibir la reacción álcali-agregado.

A continuación se presenta el análisis químico de los 3 cementos escogidos:

COMPUESTO	CEMENTO DE ALTO CONTENIDO DE ALCALIS	CEMENTO DE BAJO CONTENIDO DE ALCALIS	CEMENTO PUZOLANICO
SiO ₂ -Sílice	20.9	21.7	15.5
Al ₂ O ₃ -Alúmina	5.8	4.3	7.9
Fe ₂ O ₃ -Oxido férrico	2.2	3.8	2.2
CaO -Cal combinada	61.8	64.0	47.5
CaO -Cal libre	0.5	0.8	0.4
MgO -Magnesio	1.4	1.2	1.1
SO ₃ -Anhídrico sulfúrico	2.9	2.1	2.7
Residuo insoluble	0.72	0.74	20.56
Pérdida por calcinación	2.8	1.0	2.2
SUMA	99.02	99.64	100.06
Na ₂ O -Oxido de sodio	0.39	0.08	0.45
K ₂ O -Oxido de potasio	0.81	0.46	0.47
Total de álcalis	0.92	0.38	0.76
C ₃ S -Silicato tricálcico	42.3	55.25	-
C ₂ S -Silicato dicálcico	28.09	20.58	-
C ₃ A -Aluminato tricálcico	11.65	4.97	-
C ₄ AF -Aluminoferrito tetracálcico	6.69	11.55	-
SUMA	88.73	92.35	-

Tabla 5. Análisis químico de los tres cementos utilizados en el estudio. El análisis presentado es por vía húmeda utilizando la norma ASTM C 114.

III. DETERMINACION DE AGREGADOS POTENCIALMENTE REACTIVOS

Los reportes de estructuras afectadas, así como el predominio en la utilización de materiales como la andesita y los basaltos dentro de la región en estudio llevaron a ponerle atención a una reacción en particular: la reacción álcali-silice.

Para tal efecto se seleccionan cuatro métodos de prueba para agregados, tres de ellos se encuentran estandarizados en la American Society for Testing and Materials (ASTM) y el otro en normas canadienses. Estos métodos son:

1. ASTM C 295 Guía estándar para la examinación petrográfica de agregados para concreto.
2. ASTM C 289 Método de prueba estándar para reactividad potencial de agregados (Método químico).
3. CSA CAN3-A23.2-XXC Método de prueba estándar para la detección acelerada de expansiones potencialmente deletéreas de barras de mortero debidas a la reacción álcali-silice (Método canadiense).
4. ASTM C 227 Método de prueba estándar para la reactividad potencial alcalina de combinaciones cemento-agregado (Método de barras de mortero).

Es importante señalar que en los dos primeros métodos enlistados arriba se estudia a los agregados desde los puntos de vista mineralógico y químico, respectivamente, tratando de descubrir si los agregados son capaces de reaccionar con los álcalis en los concretos; pero el estudio se les hace en forma aislada, es decir, sólo a los agregados. En los dos últimos métodos se hacen combinaciones cemento-agregado para determinar si se presenta una reacción álcali-silice, lo que parece tener ventaja pues se trata de reproducir las condiciones reales a las que se sujetarán los agregados en las estructuras de concreto.

En este capítulo se describen los métodos de prueba utilizados y se presentan los resultados obtenidos en cada uno de ellos. Cabe señalar que el orden en que fueron enlistados es el mismo que se recomienda en campo para su ejecución cuando se sospecha de que los agregados que se utilizarán son reactivos.

A. Método de prueba ASTM C 295. Examen petrográfico.

Por medio de examen petrográfico se identifican los constituyentes de un agregado. Algunas características que deben señalarse en una evaluación petrográfica son: tipo de roca, forma de partícula, tamaño de grano, color, composición mineralógica, cortes e incrustaciones, partículas deletéreas, textura de la superficie de partícula, estructura interna, condiciones físicas, etc.⁽²⁶⁾

Los procedimientos que se emplean en la evaluación petrográfica son variados, algunos de ellos son: observación en el microscopio óptico, difracción de rayos X y algunos métodos térmicos. La elección del procedimiento depende de los propósitos de la evaluación y de la naturaleza de las muestras.

Los resultados del examen petrográfico dependen entre otras cosas de la representatividad de las muestras, la información que se le dé al petrógrafo sobre la fuente de la muestra, así como el uso que se pretenda darle, y la habilidad del petrógrafo para correlacionar todos estos datos con las observaciones del material.

En la guía estándar para la evaluación petrográfica de agregados para concreto proporcionada por la ASTM bajo la especificación C 295 se hace mención de los pasos recomendados para llevarla a cabo. La guía esta hecha asumiendo que la persona que la utiliza tiene experiencia en el campo de la petrografía y por ello no describe las técnicas del trabajo petrográfico (observación petrográfica). En ella, sólo se mencionan los aparatos necesarios, la manera en que se toma la muestra, los procedimientos para el examen de gravas y arenas naturales y manufacturadas, el procedimiento para el examen de corazones de roca, los cálculos y el reporte que debe hacerse.⁽²⁶⁾

Para este estudio, las doce muestras (seis gravas y seis arenas de origen andesítico y basáltico) son revisadas bajo el campo de microscopios estereoscópico y petrográfico, de acuerdo con el procedimiento indicado en la norma ASTM C 295. La ubicación de los bancos de donde proceden las muestras se señalan en la fig 9 del capítulo II.

Los resultados de la evaluación petrográfica de las muestras señaladas se presentan en las tablas 6 y 7. Los porcentajes indicados para cada componente citado en dichas tablas, se obtienen de acuerdo con el número de partículas observadas, aplicando la técnica de conteo de puntos.

BANCO	COMPONENTES (%)								
	ANDESITA GRIS	ANDESITA ROSA	POMEZ Y ESQUIRLAS VÍTREAS	FELDESPATOS	Fe-Mg FERROMAGNESIANOS	CUARZO			
EL MILAGRO	21; B, D	10; R, D	33; R, D	21; B, I	12; B, I	3; B, I			
LAGRECOSA	35; B, D	7; B, D	25; R, D	20; B, I	11; B, I	2; B, I			
SAMPERIO	30; B, D	2; B, D	24; R, D	24; B, I	15; B, I	5; B, I			
LA MEXICANA	37; B, D	6; R, D	29; R, D	18; B, I	9; B, I	1; B, I			
	COMPONENTES (%)								
	BASALTO GRIS OSCURO	BASALTO GRIS CLARO	BASALTO ROSA	BASALTO ROJIZO	BASALTO OCRE	FELDESPATOS	ESQUIRLAS VÍTREAS	Fe-Mg FERROMAGNESIANOS	OLIVINO
TRIBASA	74; B, I?			7; B, I?	2; M, I?	6; B, I	8; B, D?	1; B, I	2; B, I
TEPOTZOTLAN	71; B, I?	15; B, I?	3; B, I?			4; B, I	5; B, D?	2; B, I	TRAZA

NOTAS:

- B= CALIDAD FISICA BUENA
 R= CALIDAD FISICA REGULAR
 M= CALIDAD FISICA MALA
 D= DELETEREO
 I= INOCUO

?= RESULTADO DUDOSO, EL MATERIAL CONTIENE SILICE AMORFA DE COMPOSICION BASICA QUE SOLO EN CASOS AISLADOS SE HA DETECTADO COMO POTENCIALMENTE REACTIVA

Tabla 6. Análisis petrográfico de las arenas usadas en el estudio.

BANCO	COMPONENTE (%)	FORMA	REDONDEZ	SUPERFICIE TEXTURAL	POROSIDAD	CALIDAD FISICA	CALIDAD QUIMICA
TRIBASA	BASALTO GRIS OSCURO (87%)	PA, T & C	ANGULAR	I, AS & ALGO CR	< 5%	BUENA	BUENA *
	BASALTO ROJIZO (12%)	PA & T	ANGULAR	I, AS & CR	< 3%	BUENA	BUENA *
	BASALTO OCRE (1%)	PA	ANGULAR	AS & TE	< 1%	REGULAR	BUENA *
EL MILAGRO	ANDESITA PORFIDICA GRIS (82%)	PAC & T	ANGULAR	I, D & AS	< 3%	BUENA	DELETEREA (MV)
	POMEZ GRIS CLARO (12%)	PA, T & C	ANGULAR-SUBANGULAR	I, D, A & AS	=35 %	REGULAR-MALA	DELETEREA (MV)
	ANDESITA PORFIDICA ROSA (6%)	PA & CA	ANGULAR	I, D & AS	< 3%	BUENA-REGULAR	DELETEREA (MV)
LAGRECOSA	ANDESITA PORFIDICA GRIS (95%)	C & PA	ANGULAR	I, D & AS	< 3%	BUENA	DELETEREA (MV)
	ANDESITA PORFIDICA ROSA (5%)	C & PA	ANGULAR	I, D & AS	< 3%	BUENA	DELETEREA (MV)
SAMPERIO	ANDESITA PORFIDICA GRIS (98%)	C & PA	ANGULAR-SUBANGULAR	I, D & AS	< 5%	BUENA	DELETEREA (MV)
	POMEZ GRIS CLARO (2%)	C & PA	ANGULAR	I, A & AS	> 30%	REGULAR-MALA	DELETEREA (MV)
LA MEXICANA	ANDESITA PORFIDICA GRIS (87%)	C, T & PA	ANGULAR	I, D & AS	< 3%	BUENA	DELETEREA (MV)
	ANDESITA PORFIDICA ROSA (13%)	C, T & PA	ANGULAR	I, D & AS	< 3%	BUENA	DELETEREA (MV)
TEPOTZOTLAN	BASALTO GRIS OSCURO (89%)	PA, T & C	ANGULAR	D, L & AS	0 %	BUENA	INOCUO
	BASALTO ROSA (11%)	PA	ANGULAR	D, L & AS	0 %	BUENA	INOCUO

NOTAS:

- | | | |
|-----------------------------|--|------------------------|
| 1. PA = PRISMATICA ALARGADA | 2. PAC= PRISMATICA ALARGADA Y CUBICA | 3. CA= CUBICA ALARGADA |
| 4. T = TABULAR | 5. C = CUBICA | 6. I = IRREGULAR |
| 7. D = DENTADA | 8. A = ACANALADA | 9. L = LISA |
| 10. AS= ASPERA | 11. TE = TERROSA | 12. CR= CAREADA |
| 13. MV= MATRIZ VITREA | 14. * MATRIZ VITREA PERO CON VIDRIOS DE COMPOSICION BASICA QUE NO SE CONSIDERAN REACTIVOS. | |

Tabla 7. Análisis petrográfico de las gravas usadas en el estudio

De las observaciones realizadas en este conjunto de agregados para concreto se pueden destacar los siguientes puntos:

1. Los bancos La Mexicana, Lagrecosa, Samperio y El milagro, todos ellos, depósitos granulares mal cementados, tienen un origen volcánico común y una composición similar.

La composición es andesita (intermedia), con pequeñas variaciones. Estos cambios incluyen la aparición de material pumítico en algunos depósitos (El Milagro y Samperio), lo que actúa en detrimento de la calidad física del banco, ya que estos productos son porosos y por tanto más ligeros.

En todas las muestras se identifica una matriz vítrea potencialmente reactiva con los álcalis del cemento.

2. Los bancos Tribasa y Tepetzotlán son depósitos de roca para trituración, con un origen ígneo volcánico y una composición química similar.

La composición es basáltica (básica), con ligeras variaciones de color y textura pero sin cambio en la composición. Los cambios de textura van desde afanítica, vesicular (Tribasa) y en ocasiones brechoide (Tepetzotlán). De estos cambios, el único que es parcialmente desfavorable para la producción de agregados para concreto, es el incremento en la textura vesicular, ya que el agregado puede resultar más ligero por el aumento de poros, aunque es importante mencionar que en este caso la resistencia física del material no se ve disminuida.

Las características físicas de estos agregados son buenas en general, con excepción de la forma de partícula, ya que en ambos casos se observa un porcentaje muy elevado de piezas planas y alargadas (lajeadas).

3. Físicamente los agregados son sanos, densos y duros, con excepción de la fracción pumítica de los bancos Samperio y El Milagro.

4. Los bancos El Milagro, Samperio y Tepetzotlán, presentan partículas con adherencias (coatings) que son indeseables en la producción de concreto.

5. Todos los bancos se consideran aptos para la fabricación de agregados para concreto desde el punto de vista físico, obviamente tomando en consideración las pequeñas desventajas que presentan algunos de ellos, ya comentadas en forma particular.

B. Método de prueba ASTM C 289. Método químico.

Este es un método rápido que permite conocer el grado de reactividad potencial de los agregados, indicado por la cantidad de reacción durante 24 h a 80° C entre el hidróxido de sodio 1N (solución normal) y el agregado que ha sido triturado y cribado para pasar la malla de 300 μm . (No. 50) y ser retenido en una malla de 150 μm . (No. 100).⁽²⁷⁾

El método puede arrojar resultados incorrectos sobre todo al utilizarse en materiales que contengan carbonato de calcio, magnesio, o hierro tales como calcita, dolomita, magnetita o siderita por lo que se recomienda que los resultados obtenidos con él sean correlacionados con otros métodos tales como el examen petrográfico, o el método de barras de mortero.

El método ha sido muy criticado por su agresividad (solución muy alcalina) y por la poca cantidad de material que se ocupa como muestra de prueba. Además se ha encontrado que muchos materiales que son reactivos pasan la prueba mientras que otros que tienen buen comportamiento en campo no lo hacen, por lo que se duda de su universalidad.⁽²⁸⁾ Sin embargo, aún con sus desventajas, es de gran ayuda para conocer en un tiempo muy corto la potencialidad deletérea de los agregados y en combinación con los resultados de otros métodos de prueba permite conocer en forma definitiva dicho potencial.

El tiempo de ejecución es de tres días por cada muestra y el material, equipo, y procedimiento utilizados se describen a continuación.

1. Material y equipo.

Todas las especificaciones para los materiales y equipos utilizados se encuentran estandarizados en la ASTM y ellas son cumplidas como marcan las normas correspondientes.

Equipo de trituración y molido. Se utiliza una trituradora de quijada y un pulverizador de disco para triturar y moler el agregado hasta hacer que pase la malla de 300 μm (No. 50). Esto sólo es necesario para las gravas, ya que las arenas sólo son cribadas.

Mallas. Se ocupan mallas de 300 μm . (No. 50) y 150 μm (No. 100) de agujeros cuadrados, tejidas con alambre.

Báscula. Se utiliza una báscula capaz de dar una precisión hasta diezmilésimas de gramo.

Recipientes de almacenamiento de la reacción o "reactores". Estos tienen una capacidad de 75 ml y están hechos de acero inoxidable resistente a la corrosión y provistos con una cubierta hermética.

Tanque de líquidos con temperatura constante o "baño María". El tanque o baño María utilizado es capaz de mantener una temperatura constante de 80 ± 1 °C por 24 horas. Esta temperatura se obtiene con el calentamiento de agua por medio de una resistencia conectada a un termostato que activa y desactiva la energía eléctrica que produce el calor necesario para dar la temperatura indicada.

Bomba para aplicar vacío. Se utiliza una bomba capaz de aplicar un vacío de 15 in (51 kPa)

Parrilla. Esta se ocupa en los casos en que sea necesario calentar y evaporar muestras. La parrilla tiene una capacidad de calentamiento hasta 400 °C.

Horno. El horno puede dar una temperatura hasta 110 °C.

Mufla. La mufla es un horno en el que se pueden tener temperaturas hasta de 1000° C y se utiliza para calcinar muestras. Las muestras son colocadas en crisoles de arcilla.

Aparatos de cristal. Todos los aparatos y vasos de cristal utilizados son de un buen grado de precisión . Estos aparatos incluyen: embudos Gooch, matraces para filtrado, matraces volumétricos, buretas, pipetas volumétricas, vidrios de reloj, agitadores de cristal, embudos para filtrado, y vasos de precipitado.

Reactivos. Todos los reactivos utilizados obedecen las especificaciones del Comité sobre reactivos analíticos de la Sociedad Americana de Química, dichos reactivos son:

Acido clorhídrico . Acido clorhídrico concentrado (HCl).

Acido clorhídrico estándar. Acido clorhídrico 0.05 N

Solución indicadora de fenolftaleína. Se prepara disolviendo 1 g de fenolftaleína en 100 ml de etanol.

Hidróxido de sodio. Solución estándar 1N.

Agua. El agua utilizada en todo el proceso de prueba es destilada.

Báscula. Se utiliza una báscula capaz de dar una precisión hasta diezmilésimas de gramo.

Recipientes de almacenamiento de la reacción o "reactores". Estos tienen una capacidad de 75 ml y están hechos de acero inoxidable resistente a la corrosión y provistos con una cubierta hermética.

Tanque de líquidos con temperatura constante o "baño María". El tanque o baño María utilizado es capaz de mantener una temperatura constante de 80 ± 1 °C por 24 horas. Esta temperatura se obtiene con el calentamiento de agua por medio de una resistencia conectada a un termostato que activa y desactiva la energía eléctrica que produce el calor necesario para dar la temperatura indicada.

Bomba para aplicar vacío. Se utiliza una bomba capaz de aplicar un vacío de 15 in (51 kPa)

Parrilla. Esta se ocupa en los casos en que sea necesario calentar y evaporar muestras. La parrilla tiene una capacidad de calentamiento hasta 400 °C.

Horno. El horno puede dar una temperatura hasta 110 °C.

Mufla. La mufla es un horno en el que se pueden tener temperaturas hasta de 1000° C y se utiliza para calcinar muestras. Las muestras son colocadas en crisoles de arcilla.

Aparatos de cristal. Todos los aparatos y vasos de cristal utilizados son de un buen grado de precisión . Estos aparatos incluyen: embudos Gooch, matraces para filtrado, matraces volumétricos, buretas, pipetas volumétricas, vidrios de reloj, agitadores de cristal, embudos para filtrado, y vasos de precipitado.

Reactivos. Todos los reactivos utilizados obedecen las especificaciones del Comité sobre reactivos analíticos de la Sociedad Americana de Química, dichos reactivos son:

Acido clorhídrico . Acido clorhídrico concentrado (HCl).

Acido clorhídrico estándar. Acido clorhídrico 0.05 N

Solución indicadora de fenolftaleína. Se prepara disolviendo 1 g de fenolftaleína en 100 ml de etanol.

Hidróxido de sodio. Solución estándar 1N.

Agua. El agua utilizada en todo el proceso de prueba es destilada.

2. Procedimiento.

a. Selección y preparación de las muestras de prueba

Como se mencionó anteriormente, de cada banco de agregados se tienen muestras de arena y grava. A ambos materiales se les hace un cuarteo para sacar muestras representativas de cada uno de ellos. Después del cuarteo se tiene listo el material con el que se trabaja.

Las arenas sólo son separadas en tamaños con ayuda de las mallas y las cantidades de arena que pasan la malla de 300 μm . (No. 50) y son retenidas en la malla de 150 μm (No. 100) son retiradas y posteriormente lavadas con un chorro de agua a presión sobre una malla No. 100 para asegurar que todo el material más fino que este tamaño sea removido.

Una vez lavado el material, éste es secado a una temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$ por 20 ± 4 h, se deja enfriar y se vuelve a cribar sobre la malla No. 100. El material así obtenido (el que se retiene en la malla No. 100 al ser cribado) se reserva para la muestra de prueba.

Las gravas tienen un proceso de preparación más largo, ya que primero se tienen que reducir las partículas para pasar la malla de 4.75 mm (No. 4) con ayuda de la trituradora de quijada y posteriormente todos los tamaños comprendidos entre la malla No. 4 y la No. 50 son recombinados y retrituroados en el pulverizador de disco hasta obtener una muestra representativa de material retenido en la malla No. 100.

Esta muestra es lavada, secada y recibada con el mismo procedimiento seguido con las arenas, obteniéndose de esta manera la muestra de prueba de las gravas.

Como se tiene un total de 6 bancos, se obtienen 12 muestras de prueba; seis de grava y seis de arena.

b. Procedimiento de reacción.

1) Se pesan tres porciones representativas 25.00 ± 0.05 g. de material seco de prueba preparado de acuerdo al inciso a. Se coloca una porción en cada uno de los reactores y se les agrega por medio de bureta 25 ml de la solución NaOH 1N. Para un cuarto reactor se agrega también con una bureta 25 ml de la misma solución NaOH para que sirva como testigo. Se sellan los cuatro recipientes y se agitan suavemente para eliminar el aire atrapado.

2) Después de que los recipientes son sellados se colocan en el baño María a $80 \pm 1^\circ \text{C}$ y se dejan ahí durante $24 \pm \frac{1}{4}$ h. Transcurrido ese tiempo los reactores se sacan y se enfrían por 15 ± 2 min bajo un chorro de agua que tiene una temperatura inferior a 30°C .

3) Inmediatamente después de que los reactores son enfriados, se abren y se filtra la solución que contienen. Para cada filtrado se utiliza un embudo Gooch con un disco de papel filtro rápido de grado analítico (No. 41) cortado para ajustarse con la base del embudo. El embudo Gooch es colocado sobre otro de goma que a su vez es introducido en el cuello del matraz para filtrado. Se conecta la bomba con el matraz para filtrado y con ella en operación se decanta una pequeña cantidad de la solución contenida en el reactor sobre el papel filtro; esto se hace para que el papel se asiente adecuadamente sobre el embudo. Sin agitar el contenido del reactor se decanta el líquido libre restante dentro del embudo, y cuando la decantación del líquido se completa se escurren los sólidos restantes (en el reactor) y se oprimen con la ayuda de un "sargento". La bomba se ajusta a una presión de 15 in (51 kPa) aproximadamente y el filtrado se continua hasta que éste se produce a razón de 1 gota cada 10 segundos. El líquido filtrado se reserva para pruebas posteriores.

Es importante señalar que para cada una de las soluciones contenidas en los reactores se utilizan diferentes embudos Gooch provistos cada uno de ellos con papel filtro y además diferentes matraces para filtrado, para prevenir una alteración en la muestra, y se trata de conseguir un tiempo de filtración igual para todas las muestras en un grupo.

4) Se filtra el testigo de acuerdo con el procedimiento descrito en 3).

5) Inmediatamente después de terminar la filtración, cada líquido filtrado se agita para asegurar homogeneidad. Se toman con pipeta volumétrica 10 ml de este líquido y se diluyen con agua hasta completar 200 ml en un matraz aforado. Esta solución diluida se reserva para la determinación del SiO_2 disuelto y la reducción de la alcalinidad.

Para el testigo se siguen los mismos pasos y de esta forma se tienen cuatro soluciones diluidas.

c. Determinación de la sílice disuelta. (Sc).

Para cada una de las soluciones obtenidas en 5) del inciso b se siguen los siguientes pasos:

1) Se transfieren por medio de una pipeta volumétrica 100 ml a un vaso de precipitado de 400 ml y se le agregan de 5 a 10 ml de HCl concentrado. Al vaso se le introduce un agitador de cristal y se le pone sobre tela de asbesto en la parrilla para evaporar, durante 24 horas aproximadamente.

2) Después de que el líquido contenido en el vaso se evapora, éste se coloca en el horno a 105°C durante 1 hora. Inmediatamente después de ser retirado del horno, se le agrega al vaso de 10 a 15 ml de HCl concentrado y agua hasta completar 150 ml. Se coloca en la parrilla tapado con vidrio de reloj y se deja hasta que el líquido este a punto de ebullición.

Una vez alcanzado el punto de ebullición se procede a retirar el vaso de la parrilla y filtrar el líquido a través de un papel filtro rápido de grado analítico (No.41). Durante el filtrado se tiene cuidado de lavar el vidrio de reloj y las paredes del vaso con ayuda de un "sargento" y con agua muy caliente, casi a punto de ebullición. El agua que surge del lavado se hace pasar también por el papel filtro.

Después de filtrar todo el contenido del vaso y lavar éste perfectamente se sigue agregando agua caliente al papel filtro con el fin de lavar los residuos que quedan en él. Se retira el papel filtro del embudo y es colocado en un crisol de arcilla. El crisol se coloca en la parrilla durante 20 minutos y después se mete a la mufla durante media hora.

3) Se saca el crisol de la mufla y se deja enfriar por media hora a temperatura ambiente. Cuando el crisol está frío se pesa su contenido en una báscula con una precisión de diezmilésimas de gramo, y este peso se registra como el contenido de sílice encontrado en 100 ml. de la solución diluida.

4) Cálculos. Se calcula la concentración de SiO_2 de la solución de NaOH filtrada del agregado de la siguiente manera:

$$S_c = 3330 \times (W_1 - W_2) \quad (8)$$

Donde:

S_c = Concentración de SiO_2 en milimoles por litro en el líquido filtrado originalmente.

W_1 = Gramos de SiO_2 encontrados en 100 ml de la solución diluida.

W_2 = Gramos de SiO_2 encontrados en 100 ml de la solución diluida que sirve como testigo.

d. Determinación de la reducción en la alcalinidad. (Rc).

Al igual que en el inciso anterior, para cada una de las soluciones obtenidas en 5) del inciso b. se siguen los siguientes pasos:

1) Se transfieren con pipeta volumétrica 20 ml de la solución diluida a un frasco Erlenmeyer de 125 ml y se le agregan de 2 a 3 gotas de solución de fenolftaleína. La solución toma un color violeta al agregarle la fenolftaleína.

2) Con ayuda de una bureta se le va agregando al frasco Erlenmeyer ácido clorhídrico 0.05 N hasta que la solución tenga un cambio de color violeta al color que tenía antes de agregarle la fenolftaleína (que en la mayoría de las muestras es transparente). Se registran los mililitros de ácido clorhídrico utilizados para hacer que la

solución tenga el cambio.

Es importante señalar que mientras se aplica el ácido clorhídrico, el líquido del frasco Erlenmeyer tiene que estar agitándose rápidamente; esto con el fin de precisar la cantidad exacta de ácido que es necesario para que toda la solución sufra el cambio de color.

3) Cálculos. Se calcula la reducción de la alcalinidad utilizando la siguiente expresión:

$$R_c = 50 (V_2 - V_1) \quad (9)$$

Donde:

- R_c = La reducción en la alcalinidad en mmol/l
- V_1 = Mililitros de HCl utilizados para obtener el cambio de color en la solución diluida.
- V_2 = Mililitros de HCl utilizados para obtener el cambio de color en la solución diluida que sirve como testigo.

3. Resultados.

La determinación de la potencialidad deletérea de las muestras a partir de los resultados es muy sencilla y sólo se tiene que tener cuidado en la dispersión de los valores obtenidos.

La norma ASTM C 289 hace mención a los resultados señalando: "Los resultados de prueba deben considerarse satisfactorios si ninguno de los tres valores de R_c (y de S_c) difieren del promedio de los tres por más de las siguientes cantidades:

- (1) cuando el promedio es 100 mmol o menos, 12 mmol/l, y
- (2) cuando el promedio es de más de 100 mmol, 12%".⁽²⁷⁾

Además proporciona una gráfica, como la mostrada en la fig 10, hecha con datos obtenidos por este método, exámenes petrográficos, expansiones de barras de mortero y resultados del desempeño de los agregados en estructuras de concreto, en donde se relacionan la sílice disuelta contra la reducción en la alcalinidad de los agregados.

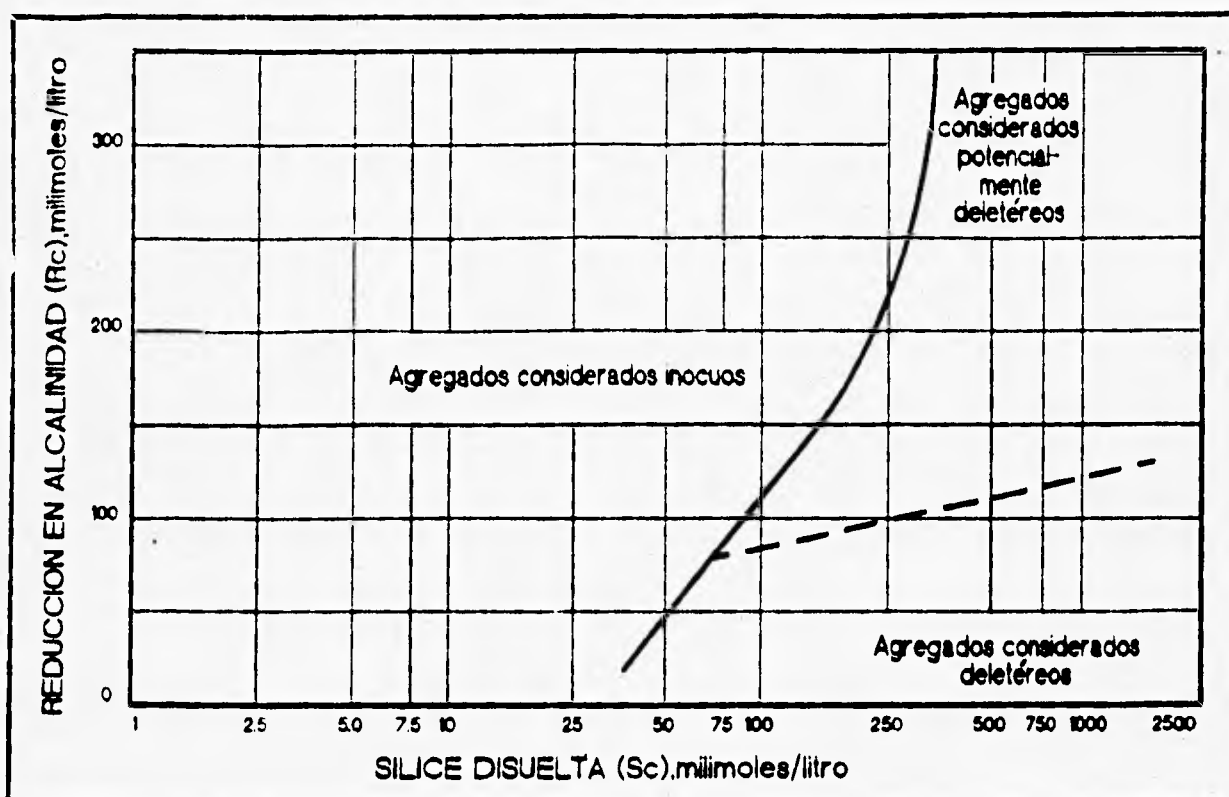


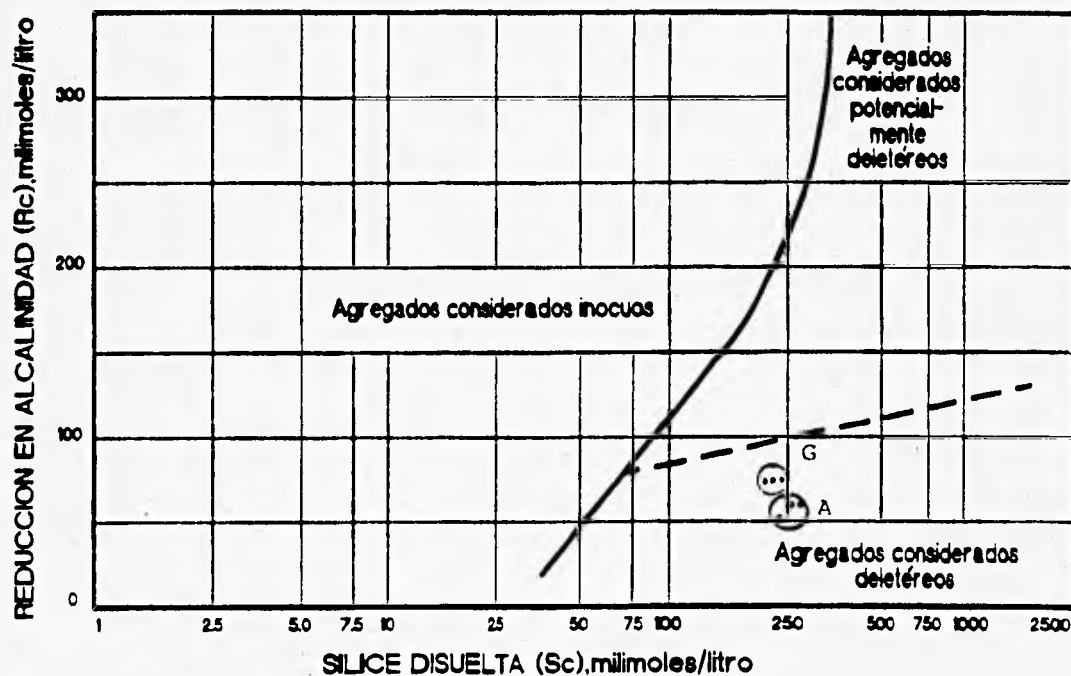
Fig. 10. Gráfica proporcionada por la ASTM para la determinación de la potencialidad deletérea de agregados para concreto bajo el método de prueba C 289.

Dentro de la gráfica existen 3 zonas; la primera, en el costado izquierdo, representa a los agregados considerados inocuos, es decir, aquellos que no presentan problemas de reactividad álcali-agregado; la segunda, costado superior derecho, representa a los agregados que podrían presentar problemas de reactividad y a estos agregados se les denomina potencialmente deletéreos; y la última zona, costado inferior derecho, representa a los agregados deletéreos o agregados que tienen problemas de reactividad.

De esta manera, una vez que se cuenta con los resultados de reducción en alcalinidad y silice disuelta de cada una de las muestras y se ha verificado que éstos cumplen con los requisitos dados en la norma, se procede a graficar y a verificar en qué zona de la gráfica caen para determinar así su grado de reactividad.

Las siguientes gráficas muestran los resultados finales obtenidos con la aplicación de este método. En cada una de ellas están contenidos los resultados de grava y arena de un mismo banco.

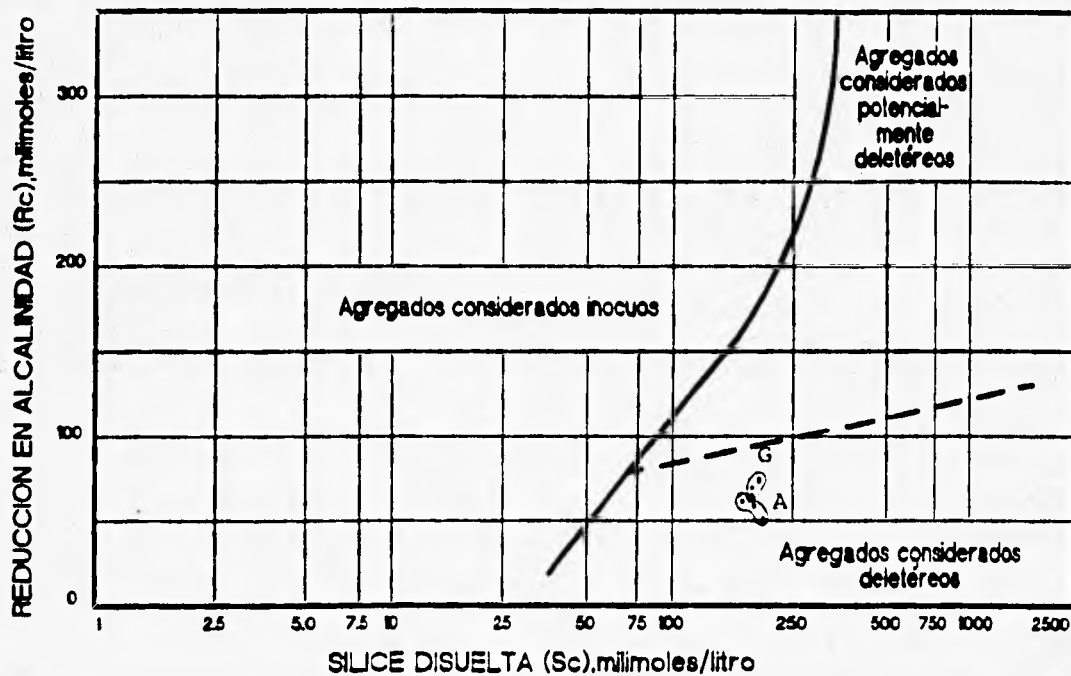
UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA		INFORME No. _____ ANEXO No. _____
	TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIATURA		BANCO: <u>TRIBASA</u>
			FECHA: <u>ABRIL 94</u>
PRUEBA DE REACTIVIDAD POTENCIAL DE LOS AGREGADOS CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO POR EL METODO QUIMICO (ASTM C-289)			
BANCO: <u>TRIBASA</u>		MUESTRA No. <u>1</u>	
AGREGADOS	SILICE DISUELTA (Sc) milimoles/litro	REDUCCION EN ALCALINIDAD (Rc) milimoles/litro	RESULTADOS
GRAVA	219	75	DELETEREO
	210	75	
	242	75	
ARENA	258	55	DELETEREO
	250	55	
	230	50	



Ensayó: HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN Revisó: ROSA ELBA RODRIGUEZ CAMACHO

Fig. 11. Resultados de los agregados procedentes del banco Tribasa bajo el método químico ASTM C 289.

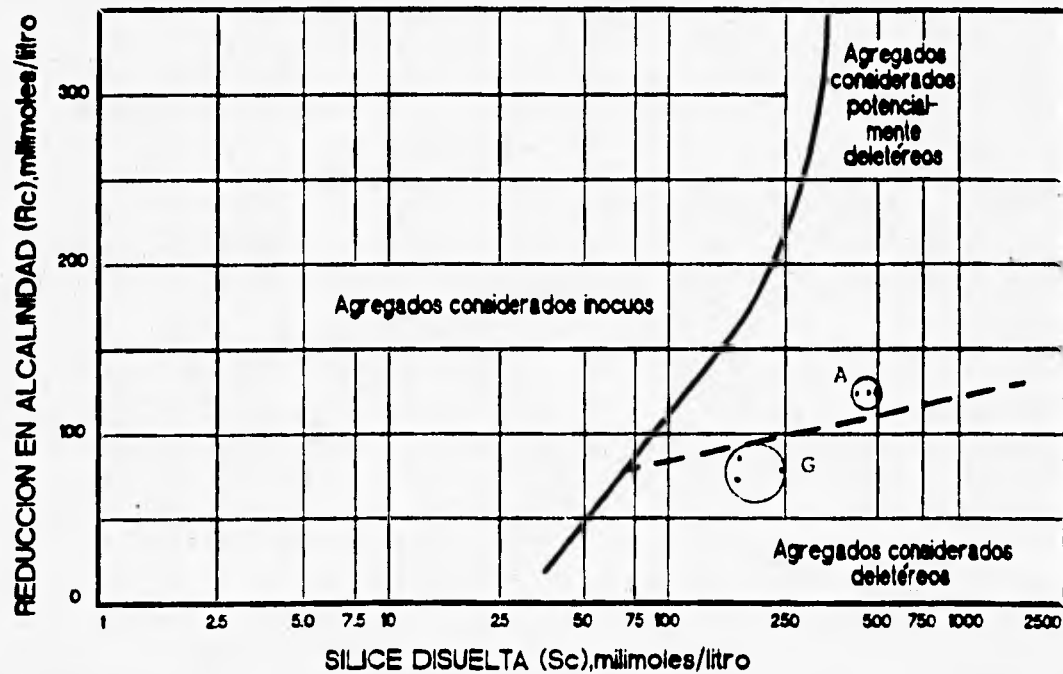
UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA		INFORME No: _____ ANEXO No _____
	TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIATURA		BANCO: <u>EL MILAGRO</u>
			FECHA: <u>ABRIL 94</u>
PRUEBA DE REACTIVIDAD POTENCIAL DE LOS AGREGADOS CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO POR EL METODO QUIMICO (ASTM C-289)			
BANCO: <u>EL MILAGRO</u>		MUESTRA No. <u>2</u>	
AGREGADOS	SILICE DISUELTA (Sc) milimoles/litro	REDUCCION EN ALCALINIDAD (Rc) milimoles/litro	RESULTADOS
GRAVA	183	70	DELETREO
	169	60	
	170	65	
ARENA	181	55	DELETREO
	187	50	
	163	60	



Ensayó: HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN Revisó: ROSA ELBA RODRIGUEZ CAMACHO

Fig. 12. Resultados de los agregados procedentes del banco El Milagro bajo el método químico ASTM C 289.

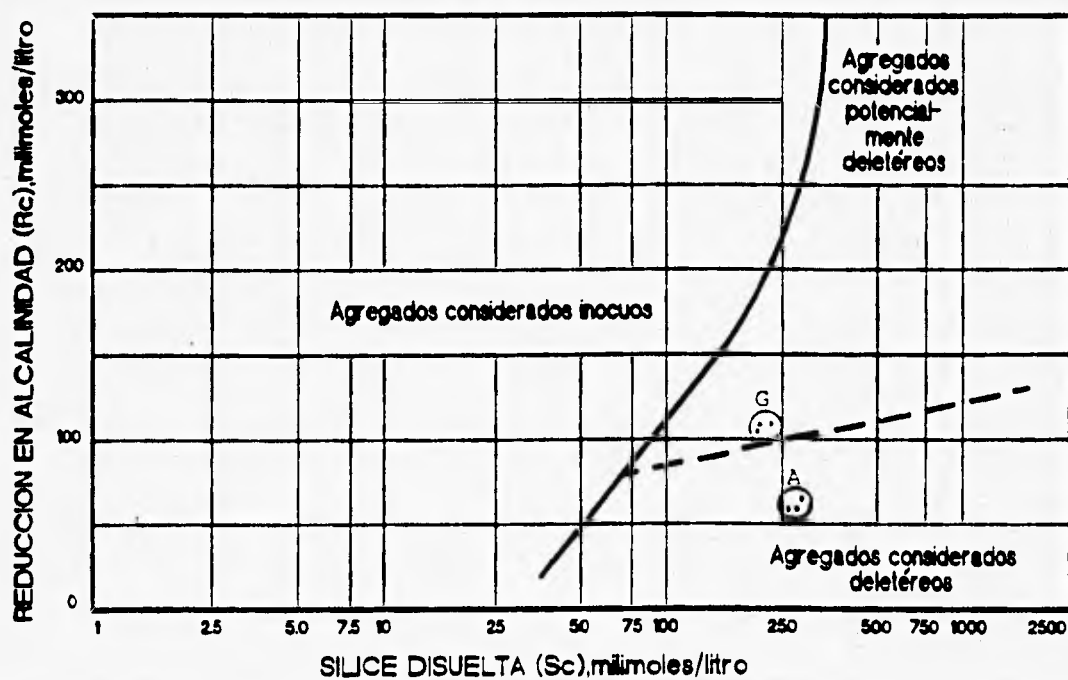
UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA		INFORME No: _____ ANEXO No: _____
	TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIATURA		BANCO: <u>LAGRECOSA</u>
FECHA: <u>ABRIL 94</u>			
PRUEBA DE REACTIVIDAD POTENCIAL DE LOS AGREGADOS CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO POR EL METODO QUIMICO (ASTM C-289)			
BANCO: <u>LAGRECOSA</u>		MUESTRA No. <u>3</u>	
AGREGADOS	SILICE DISUELTA (Sc) milmoles/litro	REDUCCION EN ALCALINIDAD (Rc) milmoles/litro	RESULTADOS
GRAVA	210	90	DELETEREO
	246	80	
	203	75	
ARENA	490	125	POTENCIALMENTE DELETEREO
	496	125	
	472	125	



Ensayó: HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN Revisó: ROSA ELBA RODRIGUEZ CAMACHO

Fig. 13. Resultados de los agregados procedentes del banco Lagrecosa bajo el método químico ASTM C 289.

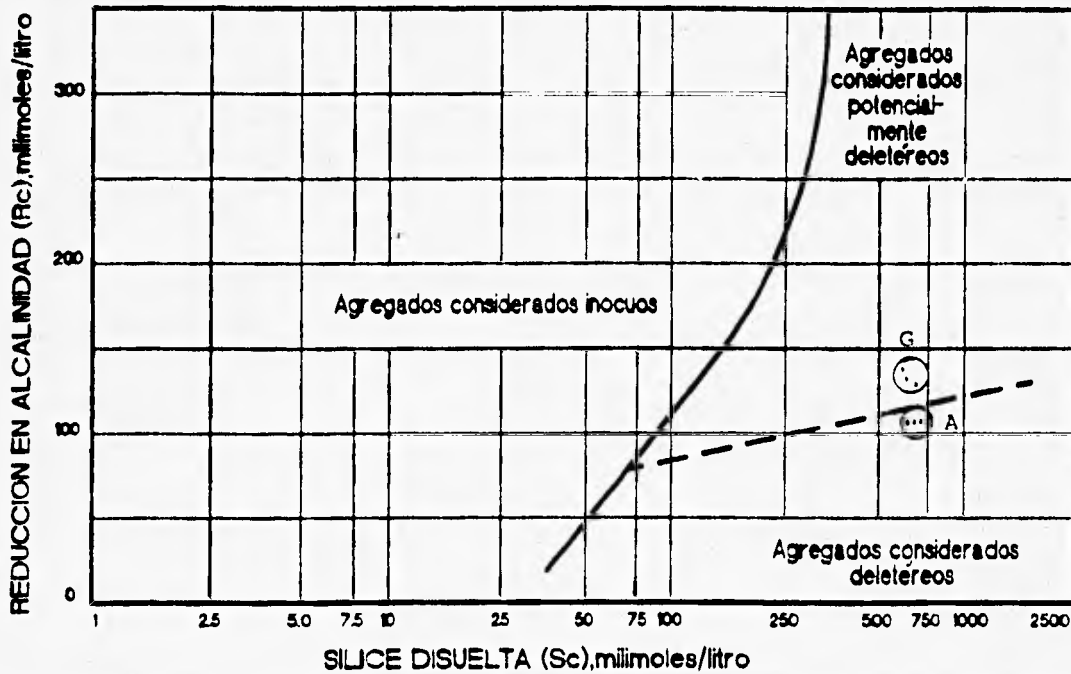
UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA		INFORME No. _____	ANEXO No. _____
	TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIATURA		BANCO: SAMPERIO	FECHA: ABRIL 94
PRUEBA DE REACTIVIDAD POTENCIAL DE LOS AGREGADOS CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO POR EL METODO QUIMICO (ASTM C-289)				
BANCO: SAMPERIO		MUESTRA No. 4		
AGREGADOS	SILICE DISUELTA (Sc) milmoles/litro	REDUCCION EN ALCALINIDAD (Rc) milmoles/litro	RESULTADOS	
GRAVA	220	105	POTENCIALMENTE DELETEREO	
	224	110		
	229	110		
ARENA	264	60	DELETEREO	
	307	65		
	293	60		



Ensayó: HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN Revisó: ROSA ELBA RODRIGUEZ CAMACHO

Fig. 14. Resultados de los agregados procedentes del banco Samperio bajo el método químico ASTM C 289.

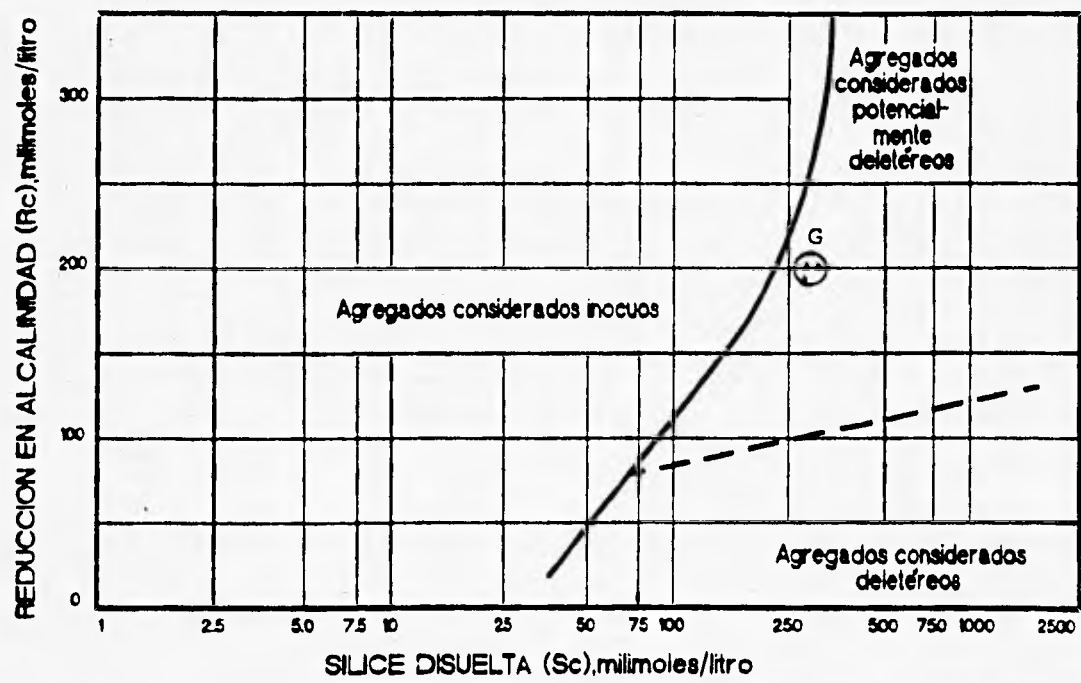
UNAM	INSTITUTO DE INGENIERIA	INFORME No. _____ ANEXO No. _____	
	TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIATURA	BANCO <u>LA MEXICANA</u> FECHA: <u>ABRIL 94</u>	
PRUEBA DE REACTIVIDAD POTENCIAL DE LOS AGREGADOS CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO POR EL METODO QUIMICO (ASTM C-289)			
BANCO <u>LA MEXICANA</u>		MUESTRA No. <u>5</u>	
AGREGADOS	SILICE DISUELTA (Sc) milimoles/litro	REDUCCION EN ALCALINIDAD (Rc) milimoles/litro	RESULTADOS
GRAVA	619	130	POTENCIALMENTE DELETEREO
	578	135	
	570	140	
ARENA	617	110	DELETEREO
	614	110	
	610	110	



Ensayó: HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN Revisó: ROSA ELBA RODRIGUEZ CAMACHO

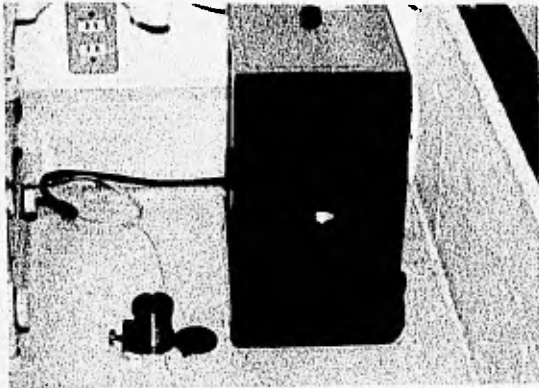
Fig. 15. Resultados de los agregados procedentes del banco La Mexicana bajo el método químico ASTM C 289.

U N A M	INSTITUTO DE INGENIERIA TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIATURA	INFORME No: _____ ANEXO No _____ BANCO: <u>TEPOTZOTLAN</u> FECHA: <u>ABRIL 94</u>	
	PRUEBA DE REACTIVIDAD POTENCIAL DE LOS AGREGADOS CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO POR EL METODO QUIMICO (ASTM C-289)		
BANCO: <u>TEPOTZOTLAN</u>		MUESTRA No. <u>6</u>	
AGREGADOS	SILICE DISUELTA (Sc) milimoles/litro	REDUCCION EN ALCALINIDAD (Rc) milimoles/litro	RESULTADOS
GRAVA	308	200	POTENCIALMENTE DELETEREO
	305	195	
	318	200	
ARENA	49	560	INOCUO
	51	555	
	53	555	

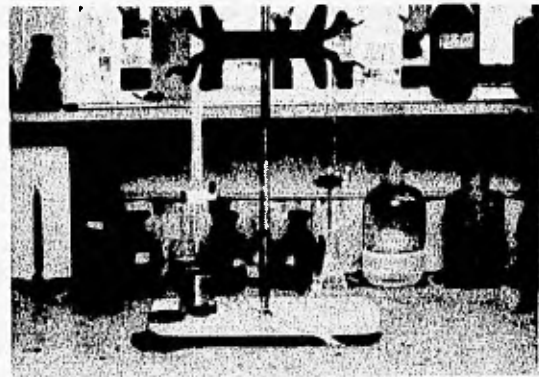


Ensayó: HOMERO JESUS MONTAÑO ROMAN Revisó: ROSA ELBA RODRIGUEZ CAMACHO

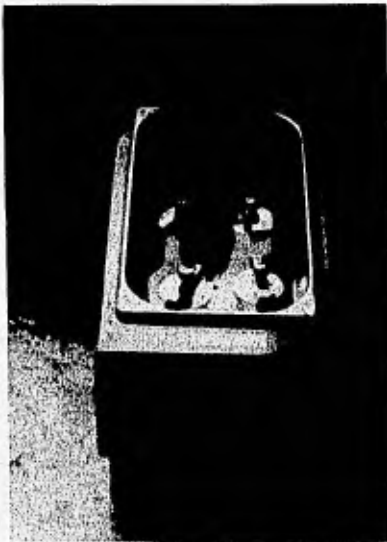
Fig. 16. Resultados de los agregados procedentes del banco Tepotzotlán bajo el método químico ASTM C 289.



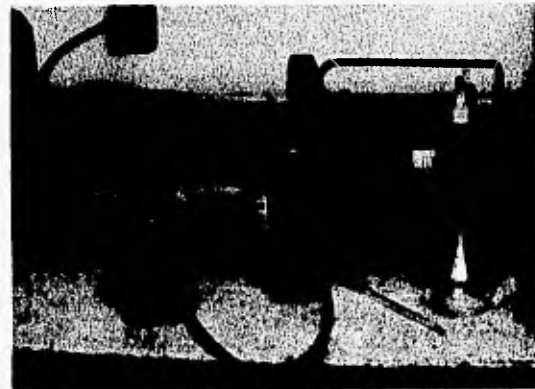
(1)



(2)



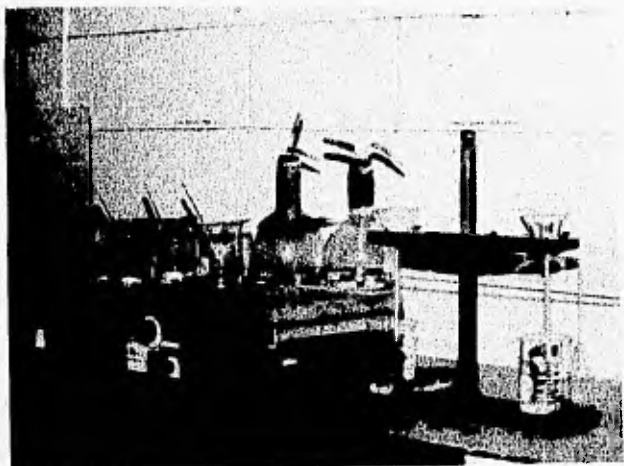
(3)



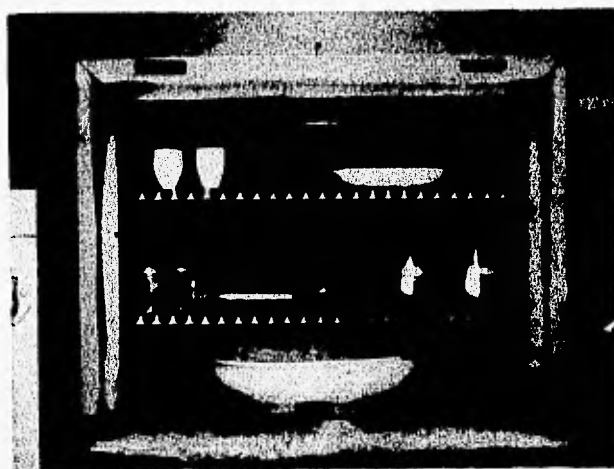
(4)

- (1) Báscula y reactor
- (2) Buretas y pipetas volumétricas
- (3) Baño María y reactores
- (4) Bomba de vacío y matraces

Fig. 17. Equipo utilizado en el método de prueba ASTM C 289 (Método químico)

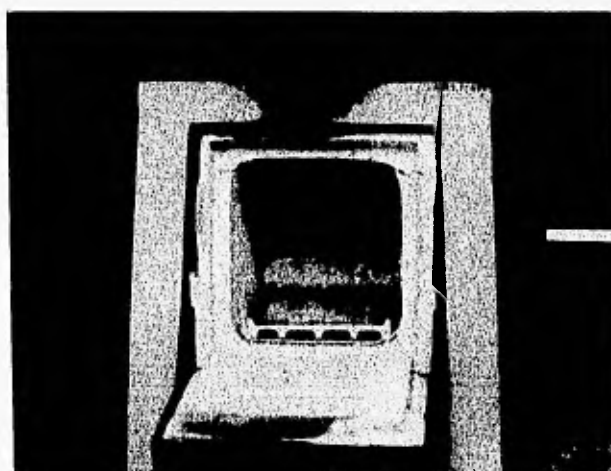


(5)



(6)

- (5) Parrilla de secado y equipo de filtrado
(6) Horno
(7) Mufla



(7)

Fig. 17. (Continuación)

C. Método de prueba CSA CAN3-A23.2-XXC. Método canadiense.

Este método, al igual que el ASTM C 289, es considerado dentro de los llamados "métodos acelerados para determinar la reacción álcali-sílice". Con él se puede saber en un período de 16 días si un agregado es susceptible a sufrir esta reacción.⁽²⁹⁾

Se considera también como un método muy agresivo, pues los especímenes elaborados para su evaluación (barras de mortero) son almacenados en horno a una temperatura de 80 °C estando sumergidos en una solución de NaOH (1N) con el fin de acelerar el mecanismo de reacción. Es por esto que los resultados obtenidos deben ser usados con mucho cuidado cuando se intenta aceptar o rechazar algún agregado.⁽²⁸⁾

Se ha determinado que algunos materiales que tienen un buen comportamiento en campo, al ser analizados con este método arrojan resultados que llevan a pensar que el material es deletéreo; se piensa que esto se debe a la agresividad señalada anteriormente. Quizá sea ésta una de las razones por las que no se acepta en muchos países; sin embargo, es un medio adecuado para aceptar materiales tras un período muy corto de observación, pues cuando un agregado se analiza por este método y se obtienen resultados que indiquen que no es deletéreo, se puede tener la confianza de que tendrá un buen comportamiento en campo.⁽¹⁸⁾

En las siguientes páginas se describe la utilización del método canadiense aplicado a los agregados y cementos escogidos para este estudio.

1. Material y equipo.

El material y equipo utilizados son los siguientes:

Equipo de trituración y molido. Se utiliza una trituradora de quijada para triturar el material hasta cumplir con la granulometría dada en el método. La trituradora sólo se utiliza con las gravas ya que las arenas sólo son cribadas.

Mallas. Se ocupan mallas de 4.75 mm (No. 4), 2.36 mm (No. 8), 1.18 mm (No. 16), 600 μ m (No. 30), 300 μ m (No. 50) y 150 μ m (No. 100) de agujeros cuadrados, tejidas con alambre.

Básculas. Se ocupa una báscula con una precisión de centésimas de gramo con una capacidad de 3 kg y otra con capacidad de hasta 25 kg.

Mezclador, paleta y recipiente de mezclado. Se ocupa un mezclador para hacer morteros provisto de un motor de 2 velocidades. El espacio libre entre la parte inferior de la paleta y el fondo del recipiente es de 0.20 ± 0.01 in (5.1 ± 0.3 mm)

Apisonador y espátula. El apisonador es de acrílico y se ocupa una espátula de acero inoxidable.

Mesa de fluidez. La mesa de fluidez empleada cumple con los requisitos señalados por la ASTM en la norma C 230. En ella se prueba la fluidez de cada una de las mezclas.

Moldes. Se utilizan 2 moldes con capacidad de 8 barras cada uno. Las dimensiones de las barras son: sección cuadrada de 25.4×25.4 y 285.8 mm de longitud. La ASTM especifica todas las dimensiones de los moldes y los índices utilizados para hacer barras de mortero en la norma C 490 y ellas son cumplidas al aplicar este método.

Horno. El horno habilitado para alojar las cajas de almacenamiento es calibrado para dar una temperatura de 80 °C y no variar por más de 2 °C para cumplir con las especificaciones del método.

Comparador de longitudes. Este aparato tiene una precisión hasta 0.0001 in (0.002 mm). Se utiliza para medir los cambios de longitud de cada una de las barras de mortero a lo largo del periodo de prueba.

Cajas de almacenamiento. Las cajas son de plástico y sólo se procura que el material con el que están hechas sea capaz de resistir una exposición prolongada a 80 °C y permanecer inertes a una solución NaOH 1N (solución normal). Su tamaño es tal, que permiten que las barras permanezcan acostadas en su interior y totalmente inmersas en la solución mencionada; además, están provistas de tres pequeñas varillas de acero inoxidable acostadas en su base para que sobre ellas descansen las barras y permitir que toda su superficie esté expuesta a la solución NaOH 1N.

Estas características son cubiertas en su totalidad por las cajas que se encuentran en el mercado útiles para almacenar comida y calentar alimentos en hornos de microondas.

Solución hidróxido de sodio. Esta solución es la misma que se utiliza en el método químico C 289 de la ASTM. Para obtenerla solo basta diluir 40 g de NaOH en agua destilada hasta completar un litro, obteniéndose así una solución normal de NaOH.

Agua. Toda el agua utilizada en el proceso de prueba es destilada para garantizar su pureza.

2. Procedimiento.

a. Selección y preparación de materiales.

Para ensayar combinaciones cemento-agregado se tienen que preparar los materiales de la siguiente manera:

1) Agregados. Al igual que en el método químico se realiza un cuarteo a las muestras para seleccionar el material con que se trabaja. Una vez que es seleccionado, las arenas son cribadas con ayuda de las mallas No. 4, 8, 16, 30, 50 y 100, separándolas de esta manera en diferentes tamaños. Cada uno de los tamaños es lavado con agua a presión con el fin de eliminar todo el polvo y partículas finas que puedan existir en ellos y posteriormente secado y almacenado en bolsas de plástico para protegerlo.

Las gravas tienen primero que ser trituradas y posteriormente cribadas y lavadas. Los números de mallas utilizadas para cribar el material son los mismos que para las arenas. Estos tamaños también son almacenados en bolsas de plástico para protegerlos.

Se trata de producir un material como el que se presenta en la siguiente tabla:

TAMAÑO DE LA MALLA		PORCENTAJE EN PESO
Pasa	Retenido	
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	10
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	25
1.18 mm (No. 16)	600 μ m (No. 30)	25
600 μ m (No. 30)	300 μ m (No. 50)	25
300 μ m (No. 50)	150 μ m (No. 100)	15

Tabla 8. Requisitos granulométricos de gravas trituradas y arenas para ensayarse en el método canadiense.

3) Cemento. Se utilizan tres cementos para combinarse con los agregados: uno con alto contenido de álcalis, otro con bajo contenido de álcalis y uno puzolánico, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los especímenes elaborados con cada uno de ellos. Las características químicas de cada uno de los cementos escogidos se mencionan en el capítulo II. Para la ejecución de este método se tiene mucho cuidado en observar que el cemento no presente grumos.

b. Preparación de especímenes de prueba.

1) Número de especímenes. Se preparan cuatro especímenes de prueba por cada combinación cemento-agregado. Los cuatro especímenes son elaborados el mismo día de trabajo. Se hacen 18 combinaciones cemento-agregado, pues se tienen 6 bancos de agregado y 3 cementos y se elaboran en total 72 especímenes (4 por combinación).

2) Preparación de moldes. Como las barras quedan sumergidas en una solución y se requiere que ésta penetre en su interior se trata de evitar que la superficie de ellas quede impregnada de aceite pues puede funcionar como repelente. Se tiene entonces la necesidad de usar cinta adhesiva Mailar como desmoldante.

La cinta es colocada en las paredes de cada una de las cavidades de los moldes impidiendo así que los morteros se adhieran a ellas y logrando que la superficie de los especímenes quede completamente limpia.

3) Proporcionamiento de mortero. Como se cuenta con muestras de arena y de grava de cada uno de los bancos se combinan ambos materiales para formar uno sólo. El proporcionamiento es: 60% de grava triturada y 40% de arena. Los materiales secos son proporcionados para el mortero de prueba usando una parte de cemento por 2.25 partes de agregado graduado, por peso. Así, para elaborar cuatro especímenes se utilizan 600 g de cemento y 1350 g de agregado (810 g de grava y 540 g de arena) obtenidos por la recombinación de las porciones retenidas sobre las distintas mallas, de acuerdo con la granulometría dada en la tabla 6.

Con respecto al agua de mezclado cabe hacer una aclaración muy importante. El método canadiense no indica que se deba hacer la prueba de fluidez a las mezclas, sólo menciona que se debe cumplir con una relación agua/cemento. Para agregados finos naturales, señala que se debe usar una relación agua/cemento igual a 0.44 y para gravas y arenas trituradas de 0.50 en relación a las masas.

Los morteros que se elaboran tienen una combinación de grava y arena, por lo tanto se utiliza un promedio obtenido con base en la proporción de éstas en las mezclas. La relación obtenida es de 0.48

De esta manera el agua total de los morteros está dada por la expresión:

$$A_t = 0.48C + A_a \quad (10)$$

Donde:

- A_t = Agua total para elaborar un mortero.
- C = Cantidad de cemento utilizada para los morteros (600 g).
- A_a = Agua de absorción de los agregados.

El contenido de agua de los morteros tiene especial atención, pues se ha observado que en este método a mayores contenidos de agua se obtienen mayores expansiones de los especímenes. Con la relación agua/cemento fija se trata de que todas las mezclas tengan el mismo contenido de agua y la misma trabajabilidad.

Sin embargo, aunque el método no pide que se haga la prueba de fluidez, ésta se realiza con el fin de tener resultados comparativos con aquellos que se obtengan en el método C 227 de la ASTM. La prueba de fluidez se realiza conforme al método de prueba ASTM C 109, sólo que con 10 caídas de 1/2 in (13 mm) en aproximadamente 6 segundos en vez de 25 caídas en 15 segundos como lo señala la norma, pues así lo indica el método C 227.

4) Mezclado de mortero. El mezclado se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Se coloca toda el agua de mezclado en el recipiente, se le agrega el cemento y se comienza a mezclar a baja velocidad (140 ± 5 rpm.) por 30 segundos.

- Se agrega la cantidad total de arena en un período de 30 segundos, mientras se esta mezclando a baja velocidad.

- Se para el mezclador y se cambia rápidamente a velocidad media (285 ± 10 rpm) manteniéndola durante 30 segundos.

- Se para el mezclador y se deja reposar al mortero por un minuto y medio. Durante los primeros 15 segundos de este intervalo, se remueve hacia el interior todo el mortero que queda en las paredes del recipiente; y en el tiempo restante se cubre el recipiente con un trapo húmedo.

- Se termina mezclando por un minuto a velocidad media .

Inmediatamente después de terminar con el mezclado, se realiza la prueba de fluidez tal y como lo marca la norma C 109, con la excepción que se hizo anteriormente (10 caídas en 6 segundos en vez de 25 caídas en 15 segundos).

5) Moldeado de los especímenes de prueba. Una vez que se termina la prueba de fluidez, se regresa el material al recipiente de mezclado y se mezcla todo el mortero por 15 segundos. Cuando termina el remezclado se comienza a llenar los moldes de los especímenes con dos capas aproximadamente iguales y compactadas con el apisonador. Se trata de que el espécimen quede homogéneo compactándolo perfectamente a lo largo, en las esquinas y alrededor de los índices. Cuando la última capa es compactada, se corta el flujo del mortero y se alisa la superficie con unas cuantas pasadas de la espátula.

c. Almacenamiento y medición de los especímenes de prueba.

Después de que los moldes se llenan con los morteros, se cubren con una franela húmeda y se mantienen así por 24 ± 2 horas. Pasado ese tiempo, los especímenes se descimbran e identifican. Además se toma la longitud inicial de cada uno de ellos.

Los especímenes de cada una de las combinaciones (4 barras) se colocan en una caja de almacenamiento (en total fueron 18 cajas) y se les agrega agua hasta dejarlos totalmente inmersos. La caja se tapa y almacena en el horno a 80 ± 2 °C por un período de 24 horas.

Medida cero. Para tomar la medida cero, las cajas se remueven del horno una a la vez, para evitar que las otras cajas pierdan temperatura al estar midiendo los especímenes de una. El proceso de medición de las barras es el siguiente: se saca la barra del agua y se seca su superficie con una toalla; se coloca en el comparador y se registra la lectura como la medida cero. Una vez tomada esta lectura la barra se deja en una toalla húmeda hasta que todas las barras de la caja son medidas. El lapso transcurrido desde que la barra abandona el agua hasta que se toma la lectura nunca es mayor de 15 ± 5 segundos y además se remueven del agua una a la vez.

Ya que se miden todos los especímenes de la caja, éstos se retiran de la toalla húmeda y se colocan en otra caja de almacenamiento que tiene suficiente NaOH 1N a 80 ± 2 °C como para dejarlos totalmente inmersos. Esta nueva caja se regresa al horno a 80 °C.

El proceso de medición de las barras de cada una de las cajas se lleva a cabo de la misma manera.

Se toman medidas subsecuentes de los especímenes a los 3, 6, 12 y 14 días después de la lectura cero. El proceso de medición de especímenes es el mismo que el descrito anteriormente sólo que después de estas lecturas los especímenes se regresan a la misma caja.

El volumen de la solución que contienen las cajas es 4 ± 0.5 veces mayor que el volumen de las barras; y el volumen de cada barra se toma como 184 ml.

d. Cálculos.

Se calcula la diferencia entre la lectura cero del espécimen y la longitud a cada período de medición y se registra como la expansión del espécimen para ese período de tiempo.

Esto es:

$$L = 100 \times (L_x - L_i) / G \quad (11)$$

Donde:

- L = Cambio de longitud a "x" edad, %
- L_x = Lectura del el espécimen a x edad, menos la lectura de la barra de referencia a la misma edad.
- L_i = Lectura cero del espécimen menos la lectura de la barra de referencia.
- G = Longitud nominal entre índices. (10 in para los moldes utilizados).

Esta fórmula se simplifica dejando fija la lectura de la barra de referencia, quedando de la siguiente manera:

$$L = (L_2 - L_1) \times 10 \quad (12)$$

Donde:

- L = Cambio de longitud a "x" edad, %.
- L_2 = Lectura del espécimen a x edad.
- L_1 = Lectura cero del espécimen.

3. Resultados.

Los resultados mostrados en las siguientes tablas son los obtenidos al realizar los morteros. En la primera columna de cada una de ellas se indica el banco de agregados utilizados para hacer el mortero, la segunda el tipo de cemento, en la tercera columna se señala la cantidad de agua empleada en la mezcla y en la cuarta la fluidez obtenida en cada caso. Por último, en la quinta columna se proporciona la identificación que recibe cada uno de los morteros.

COLADO No. 1

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
TRIBASA	ALTO	309	80	1A
EL MILAGRO	ALTO	328	65	2A
LAGRECOSA	ALTO	324	83	3A
SAMPERIO	ALTO	329	85	4A
LA MEXICANA	ALTO	341	79	5A
TEPOTZOTLAN	ALTO	345	38	6A
TRIBASA	BAJO	309	88	1B
EL MILAGRO	BAJO	328	82	2B

Tabla 9. Características de los morteros ensayados bajo el método de prueba CSA CAN3-A 23.2-XXC.

COLADO NO. 2

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
LAGRECOSA	BAJO	324	92	3B
SAMPERIO	BAJO	329	93	4B
LA MEXICANA	BAJO	341	89	5B

Tabla 10. Características de los morteros ensayados bajo el método de prueba CSA CAN3-A 23.2-XXC.

COLADO No. 3

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
TEPOTZOTLAN	BAJO	345	49	6B
TRIBASA	PUZOLANICO	309	52	1C
EL MILAGRO	PUZOLANICO	328	44	2C
LAGRECOSA	PUZOLANICO	324	59	3C
SAMPERIO	PUZOLANICO	329	62	4C
LA MEXICANA	PUZOLANICO	341	53	5C
TEPOTZOTLAN	PUZOLANICO	345	11	6C

Tabla 11. Características de los morteros ensayados bajo el método de prueba CSA CAN3-A 23.2-XXC.

Los criterios que proporciona el método para calificar las expansiones de los especímenes son los siguientes:

1. Cuando el promedio de las expansiones de los especímenes excede de 0.20 % a 16 días de edad (14 días desde la medida cero) se considera a las expansiones potencialmente deletéreas.

2. Cuando el promedio de las expansiones de los especímenes es menor de 0.10 % a 16 días de edad se considera que existe un comportamiento inocuo.

3. Cuando el promedio de las expansiones de los especímenes es mayor a 0.10 % pero menor a 0.20 % los resultados no son concluyentes.

Es necesario aclarar que los criterios anteriores son los señalados en la edición del método de enero de 1990 realizada por R.D. Hooton y C. Rogers y que actualmente en Canadá se trabaja en una nueva edición en donde se propone que el límite de 0.10 % se incremente a 0.15 %. ⁽³⁾

Las siguientes gráficas muestran el desarrollo de la expansión de los especímenes de cada combinación cemento-agregado al estar almacenados bajo las condiciones descritas de prueba.

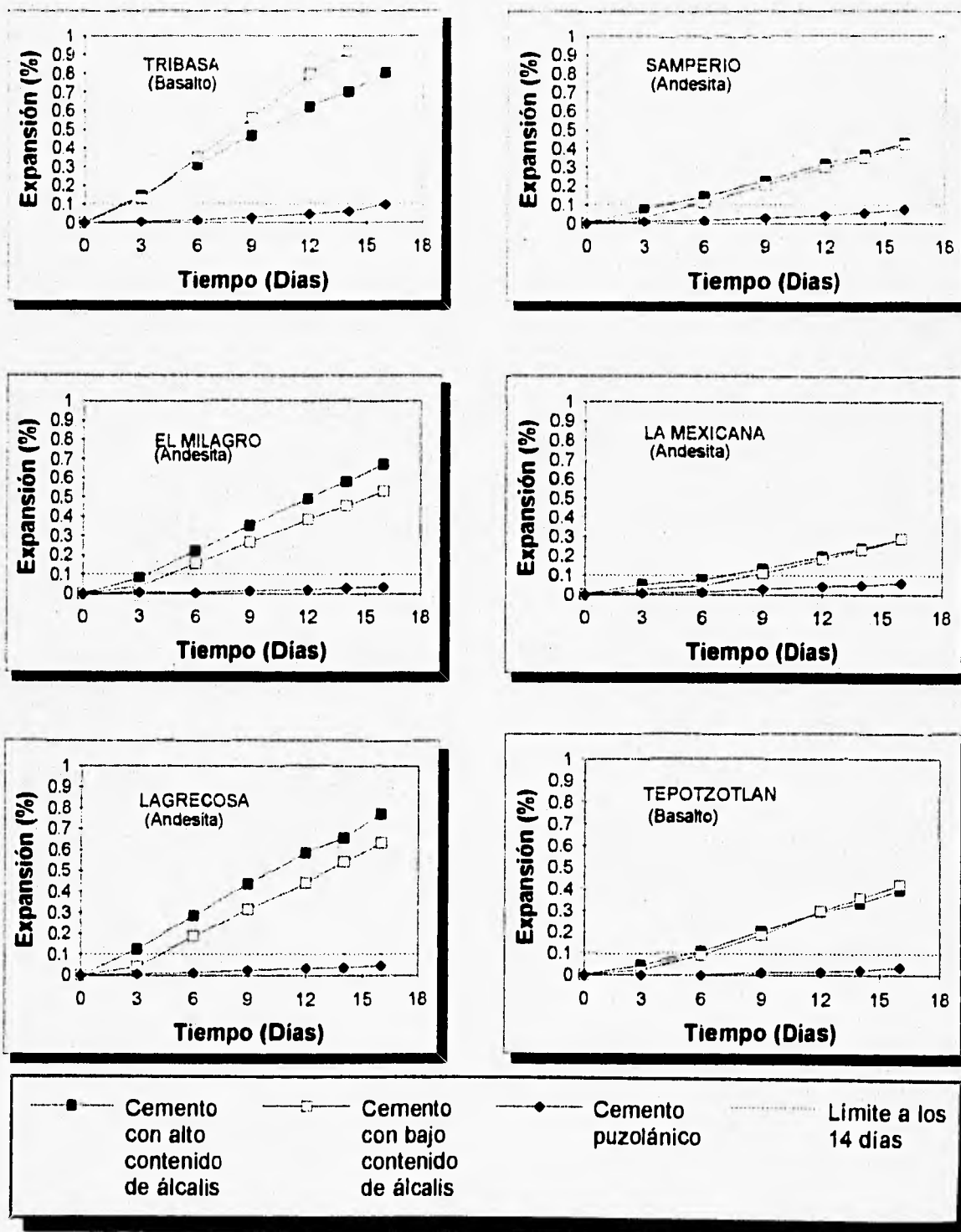


Fig. 18. Expansiones de barras de mortero bajo el método de prueba CSA CAN3-A23.2-XXC. La dosificación de agregados para los morteros es 40 % de arena y 60 % de grava triturada del mismo banco. Las expansiones reportadas son el promedio de 4 barras.

Puede observarse en las gráficas que los morteros hechos con cementos puzolánicos sufren expansiones menores al límite propuesto por este método. Esto puede significar dos cosas: 1. La puzolana controla la reacción álcali-agregado y 2. Debido a que con el cemento puzolánico las mezclas quedan más secas, puede concluirse que la puzolana absorbe agua y en consecuencia, la reacción agua-cemento disminuye repercutiendo esto en las expansiones.

Ya se ha mencionado en el procedimiento que se ha observado que a menores relaciones agua-cemento las expansiones son menores en este método. Por lo tanto, se procede a elaborar nuevos especímenes hechos con cemento puzolánico pero aumentando el contenido de agua de la mezcla, hasta hacer que la fluidez de los morteros hechos de esta manera sea parecida a la obtenida con los otros dos cementos (alto y bajo contenido de álcalis). De esta manera sólo queda abierta la posibilidad de que la puzolana efectivamente controle la reacción.

Las características de los nuevos morteros y especímenes, hechos con cemento puzolánico son las siguientes:

COLADO No. 4

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
TRIBASA	PUZOLANICO	326	83	1C
EL MILAGRO	PUZOLANICO	354	82	2C
LAGRECOSA	PUZOLANICO	344	80	3C
SAMPERIO	PUZOLANICO	349	84	4C
LA MEXICANA	PUZOLANICO	374	87	5C
TEPOTZOTLAN	PUZOLANICO	405	84	6C

Tabla 12. Características de los morteros agregado-cemento puzolánico realizados bajo el método de prueba CSA CAN3-A 23.2-XXC, e incrementando el contenido de agua hasta obtener la fluidez semejante a las alcanzadas al usar cementos con alto y bajo contenido de álcalis.

En la tabla se observa que las fluideces de las nuevas mezclas son uniformes y semejantes a las obtenidas con los cementos de bajo y alto contenido de álcalis. De esta manera se cumple con el objetivo de uniformizar las fluideces y sólo resta observar el comportamiento de las expansiones de los especímenes

Las gráficas obtenidas con las nuevas mezclas son las siguientes:

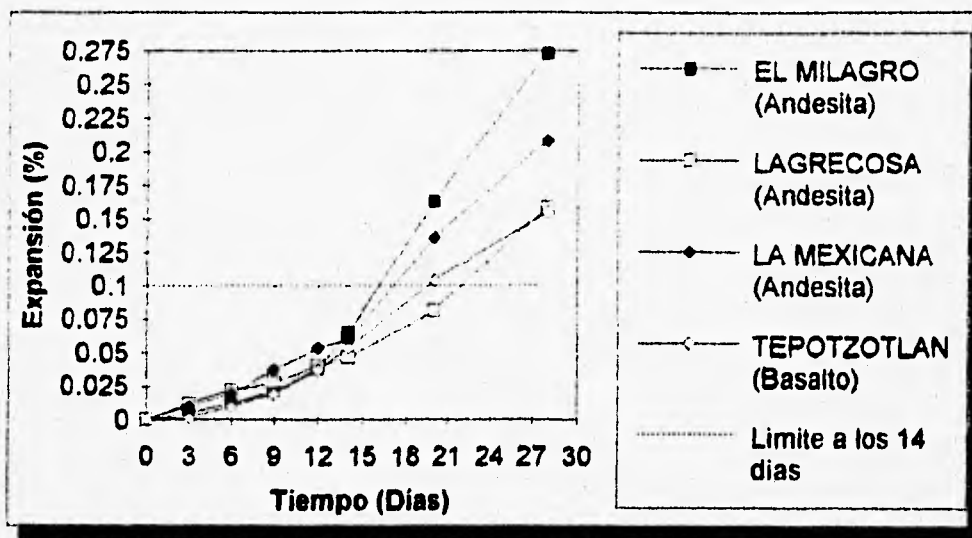


Fig. 19. Expansiones de barras de mortero de 4 combinaciones agregado-cemento puzolánico bajo el método de prueba CSA CAN3-A23.2-XXC al incrementar el contenido de agua de las mezclas.

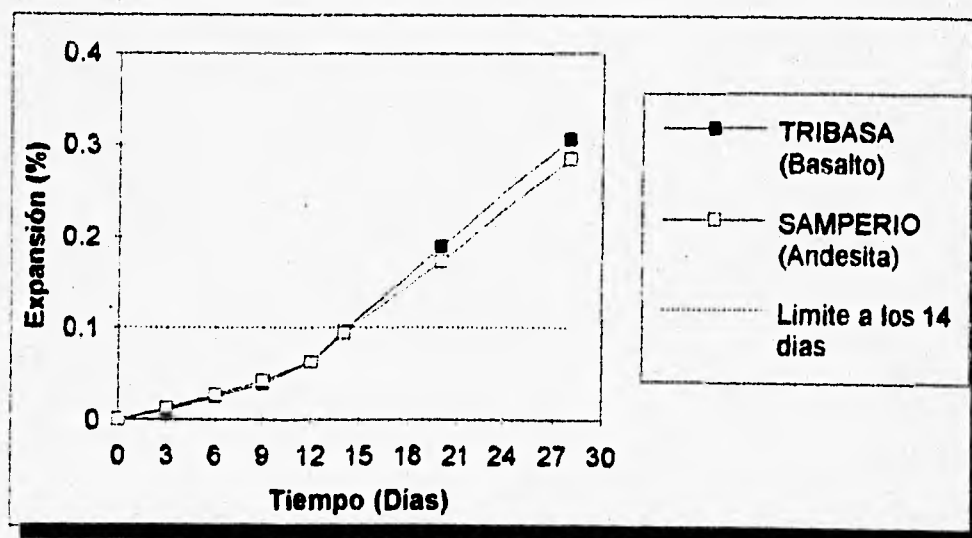
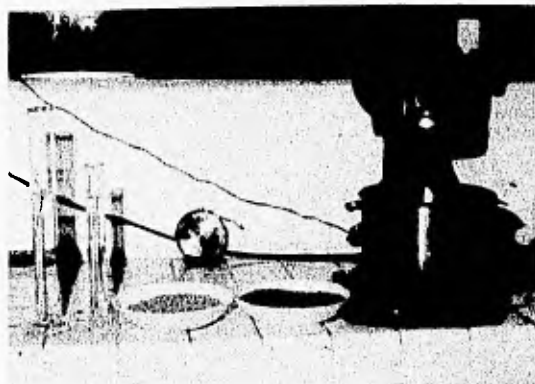


Fig. 20. Expansiones de barras de mortero de 2 combinaciones agregado-cemento puzolánico bajo el método de prueba CSA CAN3-A23.2-XXC al incrementar el contenido de agua de las mezclas.



(1)



(2)



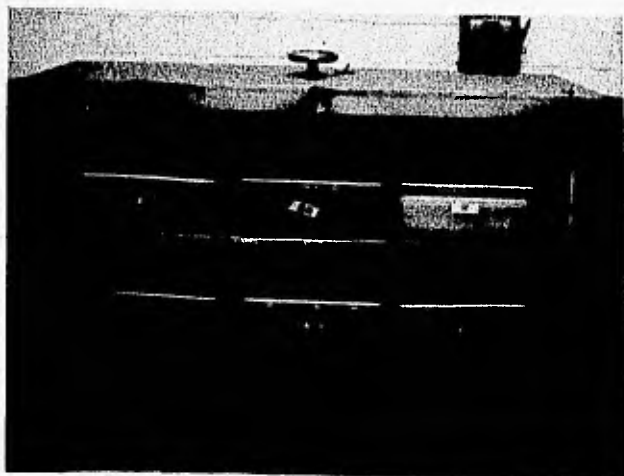
(3)



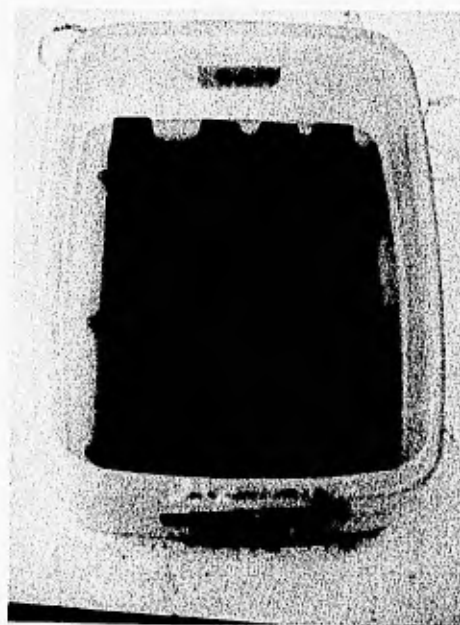
(5)

- (1) Pesado de materiales
- (2) Mezcladora
- (3) Mezclado de morteros
- (4) Determinación de la fluidez en mesa de fluidez
- (5) Moldeado de especímenes

Fig. 21. Elaboración de barras de mortero para los métodos de prueba CSA CAN3-A23.2-XXC (Método canadiense) y ASTM C 227 (Método de barras de mortero).



(1)



(2)

- (1) Almacenamiento en horno
- (2) Barras en solución NaOH 1N
- (3) Medición de especímenes

(3)

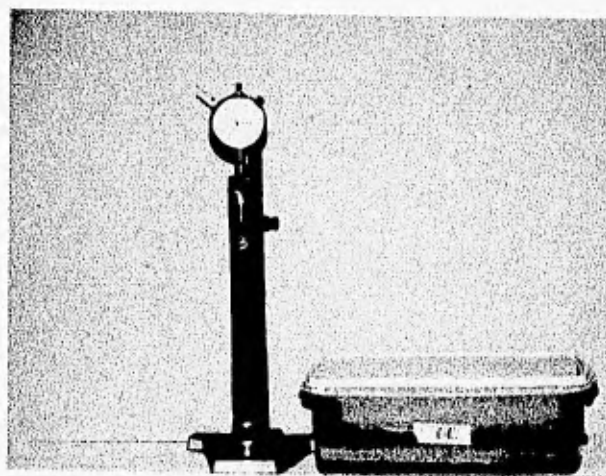
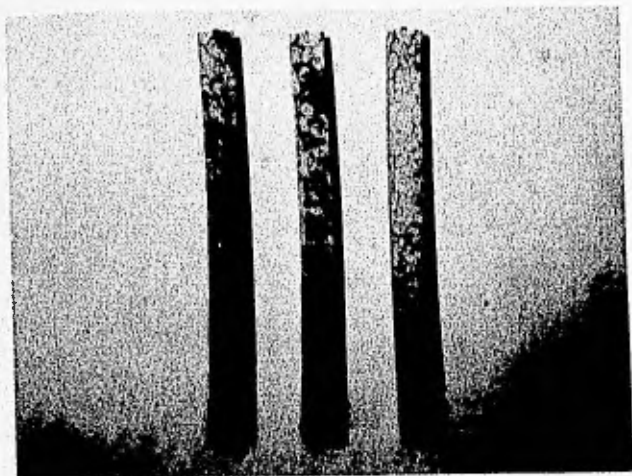
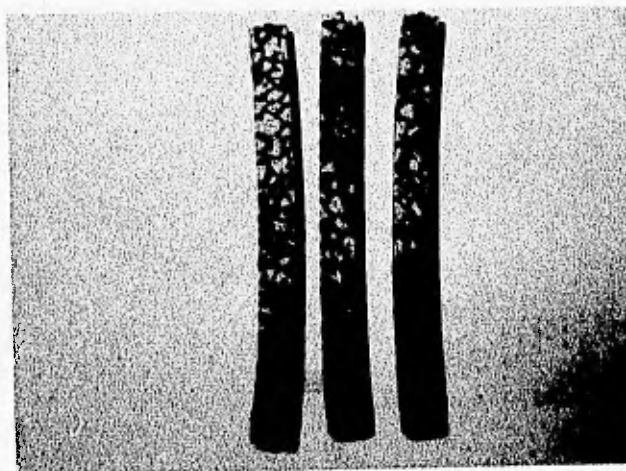


Fig. 22. Almacenamiento y medición de especímenes de prueba en el método CSA CAN3-A23.2-XXC (Método canadiense).



(1)



(2)

(3)

AGREGADO: TRIBASA

- (1) Mortero con cemento de alto contenido de álcalis
- (2) Mortero con cemento de bajo contenido de álcalis
- (3) Mortero con cemento puzolánico

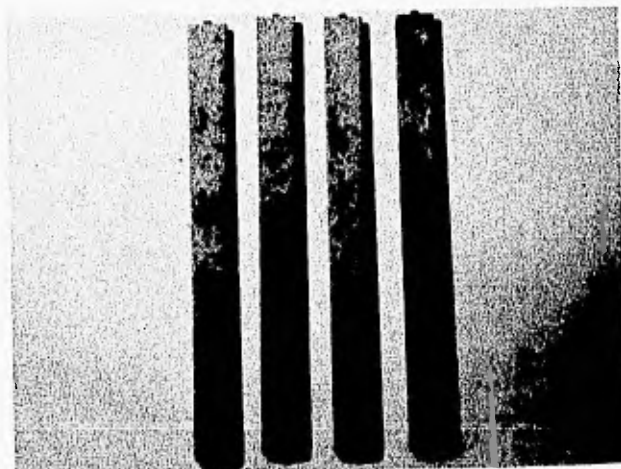
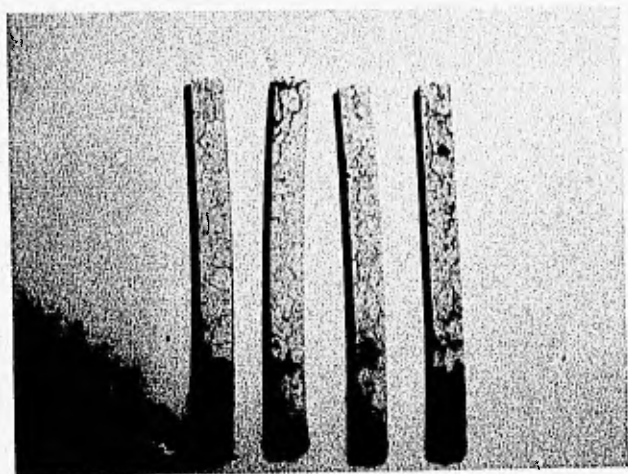
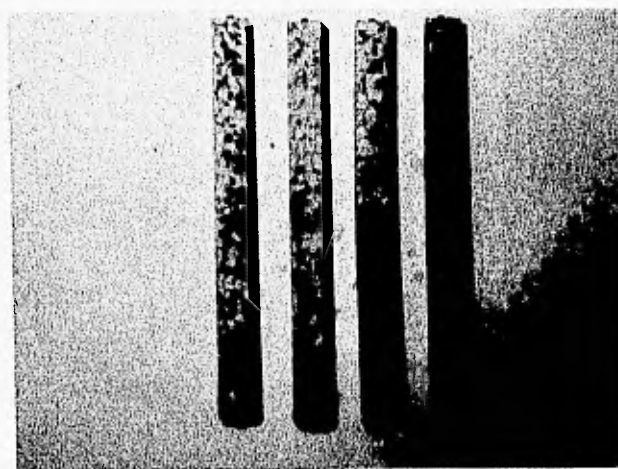


Fig. 23. Aspecto de las barras de mortero después de ser almacenadas en una solución NaOH 1N a 80 °C en el método de prueba CSA CAN3-A23.2-XXC (Método canadiense).

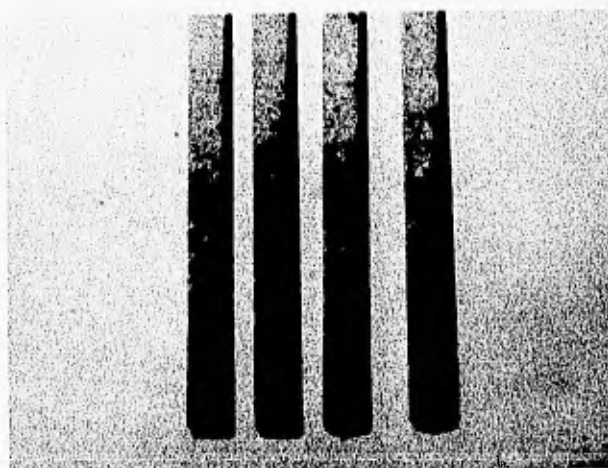


(1)



(2)

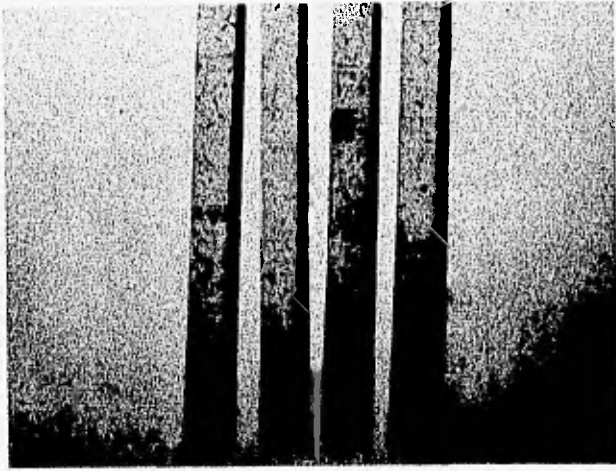
(3)



AGREGADO: EL MILAGRO

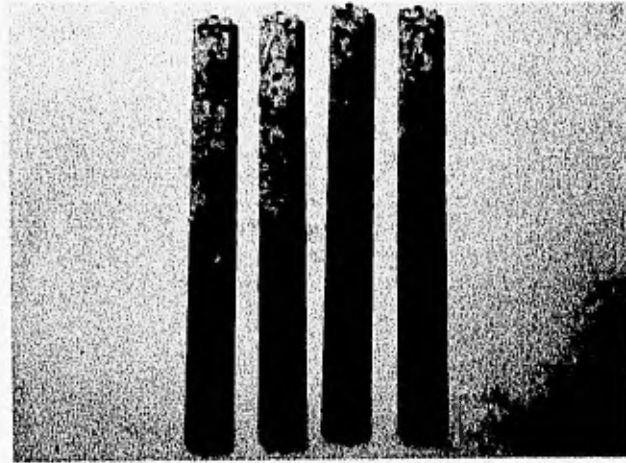
- (1) Mortero con cemento de alto contenido de álcalis
- (2) Mortero con cemento de bajo contenido de álcalis
- (3) Mortero con cemento puzolánico

Fig. 23. (Continuación)



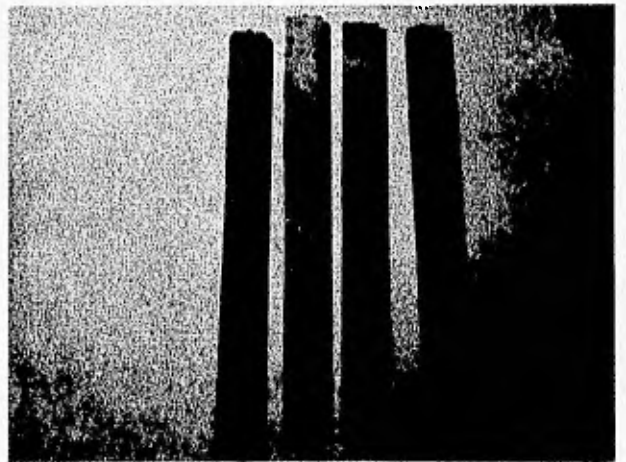
(1)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA



(2)

(3)



AGREGADO: TEPOTZOTLAN

- (1) Mortero con cemento de alto contenido de álcalis
- (2) Mortero con cemento de bajo contenido de álcalis
- (3) Mortero con cemento puzolánico

Fig. 23. (Continuación)

D. Método de prueba ASTM C 227. Método de barras de mortero.

El método de prueba C 227 para determinar la reacción álcali-sílice es un método prolongado pero sus resultados son muy satisfactorios. En él se trata de determinar la tendencia a reaccionar de diferentes combinaciones cemento-agregado mediante la medida del cambio en la longitud de barras de mortero hecho con esos materiales, durante el almacenaje de éstas bajo condiciones prescritas de prueba.⁽³⁰⁾

"Los resultados de pruebas usando este método proporcionan información sobre la probabilidad de que una combinación cemento-agregado sea potencialmente capaz de provocar una reacción álcali-sílice con una consecuente expansión deletérea del concreto. El criterio para determinar el deterioro-potencial de la reacción álcali-sílice de combinaciones cemento-agregado a partir de los resultados de éste método de prueba es: expansiones mayores que 0.10% a los 6 meses, deben ser consideradas capaces de dañar las estructuras por efecto de la reacción. Cuando no se tuvieran resultados a los 6 meses, las combinaciones deben ser consideradas potencialmente capaces de provocar una reacción alcalina dañina, si ellas muestran expansiones mayores que 0.05% a los tres meses".⁽³⁰⁾

También pueden surgir expansiones muy pequeñas aún cuando se utilice un cemento con alto contenido de álcalis combinado con un agregado reactivo, ésto debido a las razones comentadas en el primer capítulo acerca de sobrepasar el "contenido pésimo de material reactivo". Otras razones que podrían inducir expansiones pequeñas es la presencia de ferrosulfatos y sulfatos en los agregados que producen un ataque sobre la pasta de cemento y materiales como la cal libre (CaO) o magnesio libre (MgO) en el cemento.

1. Material y equipo.

La elaboración de especímenes de prueba (barras de mortero) para la ejecución del método C 227 de la ASTM es idéntica a la descrita en el método canadiense. En consecuencia, el equipo utilizado en la preparación del material, así como aquel que se ocupa en la elaboración de morteros es el mismo en ambos métodos. Lo único que varía son las condiciones de almacenamiento de los especímenes, por lo que es necesario habilitar lo siguiente:

Cajas de almacenamiento. Se utilizan cajas de almacenamiento cubiertas con una tapa hermética capaces de guardar agua y vapor en su interior sin sufrir pérdidas durante el almacenado de los especímenes de prueba. Las cajas son construidas de acero

inoxidable y están provistas de unos soportes, para mantener verticalmente a las barras y evitar el contacto entre ellas, y de un fondo falso para garantizar que el extremo más bajo de los especímenes esté aproximadamente a una pulgada (aprox. 25 mm) encima de la superficie de agua en la caja.

Horno. El horno habilitado para alojar las cajas de almacenamiento es calibrado para dar una temperatura de 38 °C y no variar por más de 1.5 °C para cumplir con las especificaciones del método.

2. Procedimiento.

Se ha insistido en que existe gran similitud entre este método y el método canadiense, por lo tanto, algunos pasos de este procedimiento no se explicarán al detalle como se hizo la primera vez. Sin embargo, se hará alusión a ellos con el fin de compararlos y encontrar similitudes y diferencias.

a. Selección y preparación de materiales.

Los agregados son preparados para producir un material como el mostrado en la tabla 6. El procedimiento de cuarteo, triturado, cribado, lavado y secado de los materiales ya se ha discutido a detalle en este estudio.

Los cementos utilizados para este método son los mismos que los ocupados en el método canadiense. Esto con el fin de comparar los resultados obtenidos en ambos métodos.

b. Preparación de especímenes de prueba.

1) Número de especímenes. Se preparan en total 4 especímenes de prueba por cada combinación cemento-agregado, pero a diferencia del método canadiense, los especímenes son elaborados en series de dos en diferentes días de trabajo, pues la ASTM recomienda que cuando se va a ensayar más de una combinación cemento-agregado y se requieran más de dos días de trabajo los especímenes deben hacerse en series de dos en diferentes días. En consecuencia el número total de especímenes es el mismo.

2) Preparación de moldes. Los moldes son aceitados y colocados en ellos los índices para las barras, tal como lo indica la norma C 490.

3) Proporcionamiento de mortero. El proporcionamiento de las mezclas no sufre variaciones con respecto al método canadiense. (Agregados: 60% de grava triturada y 40% de arena. Y para hacer los morteros 1 parte de cemento por 2.25 partes de agregado graduado en peso como el mostrado en la tabla 6). Para hacer dos

especímenes se ocupan 300 g de cemento y 675 g de agregado.

El agua de mezclado utilizada es la necesaria para producir una fluidez de 105 a 120 % (determinada como lo indica la norma ASTM C 109, con 10 caídas de 1/2 in (13 mm) en aproximadamente 6 segundos en vez de 25 caídas en 15 segundos como lo señala la misma norma, pues así lo indica el método).

4) Mezclas de mortero. El mezclado del mortero y la realización de la prueba de fluidez no tienen variaciones con respecto al método canadiense. Se siguen los mismos pasos y se respetan los tiempos de mezclado.

5) Moldeado de los especímenes. Cuando se termina con el mezclado y se realiza la prueba de fluidez el mortero se regresa a la mezcladora para aplicarle un remezclado por 15 segundos. Después de este lapso el mortero se coloca en los moldes en dos capas aproximadamente iguales y compactadas con el apisonador de la misma manera y siguiendo las mismas recomendaciones mencionadas en el método canadiense.

c. Almacenamiento y medición de los especímenes de prueba.

Ya que los moldes se encuentran llenos con los morteros, éstos se tapan con una franela húmeda para asegurar que los especímenes tengan una atmósfera con humedad relativa mayor al 50% que es lo que indica la norma como mínimo. En estas condiciones permanecen por 24 ± 2 horas. Transcurrido este tiempo, los especímenes se descimbran e identifican y con la ayuda del comparador se toma la longitud inicial de cada uno de ellos.

Después de haber tomado la primera lectura se procede a colocarlos en los soportes de tal manera que queden completamente verticales, pero sin que su peso sea soportado por los índices. Cuando se tienen todos los especímenes colocados en los soportes se introducen en la caja de almacenamiento y ésta se sella y se coloca en el horno por doce días a una temperatura de 100 ± 3 °F (37.8 ± 1.7 °C). Después de transcurrido ese tiempo, la caja se saca del horno y se almacena en un cuarto a 73.4 ± 3 °F (23 ± 1.7 °C) durante 24 horas para después abrirla y tomar una segunda lectura de longitud al tener los especímenes 14 días de edad.

Después de la segunda medición la caja vuelve a sellarse y almacenarse en el horno a la misma temperatura (100 ± 3 °F). Se toman seis lecturas más a las edades de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 meses. Cada vez que se hacen las mediciones, la caja se remueve con 24 horas de anticipación y se transfiere a un cuarto mantenido a 73.4 ± 3 °F (23 ± 1.7 °C), se lava y se cambia el agua que contiene.

Es importante señalar que a la hora de tomar la lectura siempre se colocan los especímenes en el comparador en la misma posición (se marca un extremo principal y éste se coloca siempre en la parte superior). Y después de cada medición la posición de los especímenes en los sostenes dentro de las cajas se invierte para comparar los

cambios de longitud con el periodo anterior. Se ocupan en total, para este estudio, cinco cajas de almacenamiento y se colocan en cada una de ellas los especímenes hechos el mismo día de trabajo, para que éstas sean abiertas un sólo día para cada una de las mediciones programadas.

d. Cálculos.

Con la misma fórmula utilizada para medir el cambio de longitud de las barras del método canadiense se calcula la diferencia entre la lectura inicial de los especímenes y la longitud a cada periodo de medición. Esto es:

$$L = (L_2 - L_1) \times 10 \quad (13)$$

Donde:

- L= Cambio de longitud a "x" edad, %
- L₂= Lectura del espécimen a x edad
- L₁= Lectura inicial del espécimen.

3. Resultados.

Los resultados mostrados en las siguientes tablas son los obtenidos al hacer los morteros. Se presentan en el mismo orden que en el método canadiense.

CAJA No. 1

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
TRIBASA	ALTO	184	106	1AI
EL MILAGRO	ALTO	190	117	2AI
LAGRECOSA	ALTO	185	115	3AI
SAMPERIO	ALTO	185	119	4AI
LA MEXICANA	ALTO	191	112	5A1
TEPOTZOTLAN	ALTO	212	108	6AI
7. TRIBASA	BAJO	170	115	1BI
8. EL MILAGRO	BAJO	180	108	2BI

Tabla 13. Características de los morteros realizados bajo el método de prueba ASTM C 227.

CAJA No. 2

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
LAGRECOSA	BAJO	180	120	3BI
SAMPERIO	BAJO	176	109	4BI
LA MEXICANA	BAJO	183	114	5BI
TEPOTZOTLAN	BAJO	216	118	6BI
TRIBASA	PUZOLANICO	190	116	1CI
EL MILAGRO	PUZOLANICO	206	120	2CI
LAGRECOSA	PUZOLANICO	193	113	3CI
SAMPERIO	PUZOLANICO	196	111	4CI

Tabla 14. Características de los morteros realizados bajo el método de prueba ASTM C 227.

CAJA No. 3

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
LA MEXICANA	PUZOLANICO	205	108	5CI
TEPOTZOTLAN	PUZOLANICO	234	105	6CI
TRIBASA	ALTO	175	107	1AII
EL MILAGRO	ALTO	188	109	2AII
LAGRECOSA	ALTO	185	113	3AII
SAMPERIO	ALTO	185	119	4AII
LA MEXICANA	ALTO	190	111	5AII
TEPOTZOTLAN	ALTO	215	108	6AII

Tabla 15. Características de los morteros realizados bajo el método de prueba ASTM C 227.

CAJA No. 4

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
TRIBASA	BAJO	170	112	1BII
EL MILAGRO	BAJO	180	109	2BII
LAGRECOSA	BAJO	175	110	3BII
SAMPERIO	BAJO	175	114	4BII
LA MEXICANA	BAJO	183	108	5BII
TEPOTZOTLAN	BAJO	215	114	6BII
TRIBASA	PUZOLANICO	190	110	1CII
EL MILAGRO	PUZOLANICO	200	108	2CII

Tabla 16. Características de los morteros realizados bajo el método de prueba ASTM C 227.

CAJA No. 5

AGREGADO	CEMENTO (CONTENIDO DE ALCALIS)	AGUA (ml)	FLUIDEZ (%)	IDENTIFICACION
LAGRECOSA	PUZOLANICO	198	119	3CII
SAMPERIO	PUZOLANICO	195	109	4CII
LA MEXICANA	PUZOLANICO	205	106	5CII
TEPOTZOTLAN	PUZOLANICO	237	107	6CII

Tabla 17. Características de los morteros realizados bajo el método de prueba ASTM C 227.

Las siguientes gráficas muestran el comportamiento de los especímenes de cada combinación cemento-agregado a lo largo de seis meses y estando almacenados bajo las condiciones descritas de prueba.

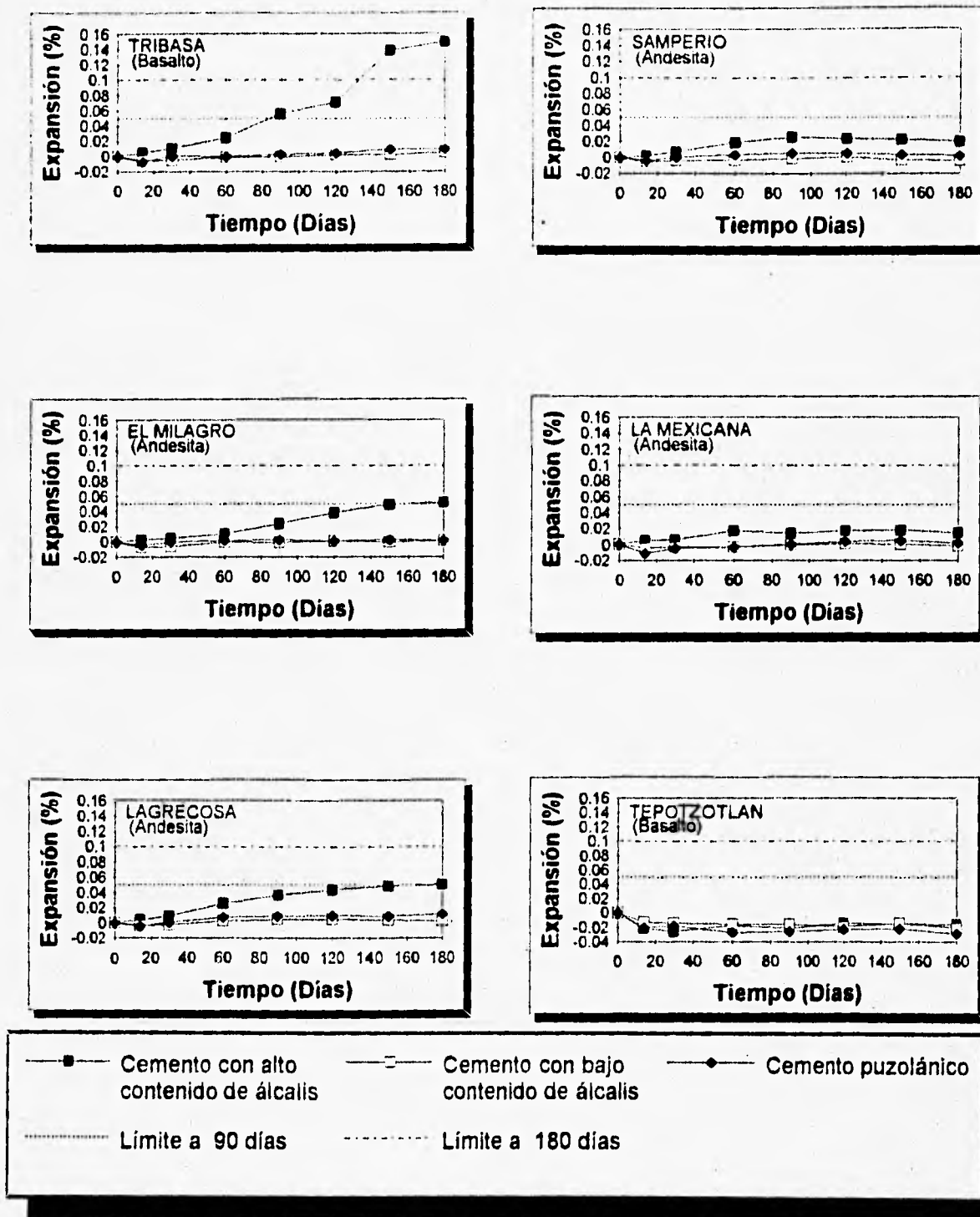
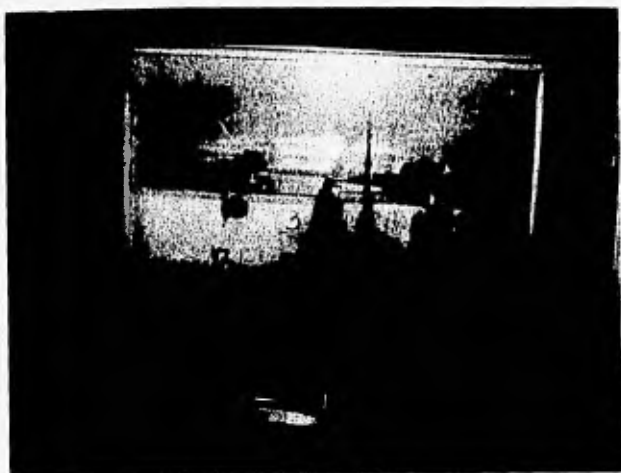
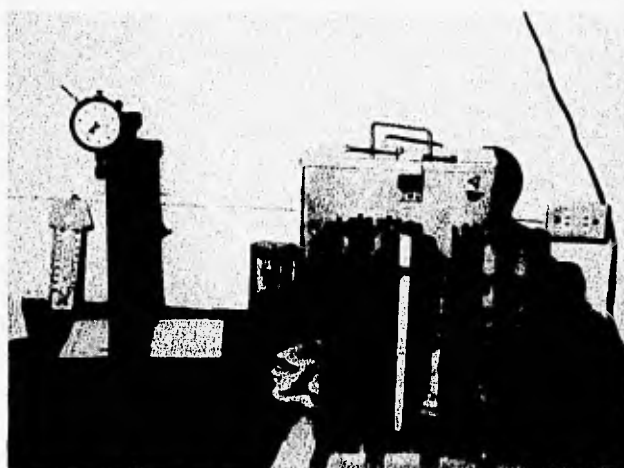


Fig. 24. Expansiones de barras de mortero bajo el método de prueba ASTM C 227. La dosificación de agregados para los morteros es 40 % de arena y 60 % de grava triturada. Las expansiones reportadas son el promedio de 4 barras.



(1)



(2)

(3)

- (1) Almacenamiento en horno
- (2) Comparador de longitudes,
cajas de almacenamiento y
soportes de barras
- (3) Medición de especímenes



Fig. 25. Almacenamiento y medición de especímenes de prueba en el método ASTM C 227 (Método de barras de mortero).

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos al ejecutar los métodos de prueba descritos para detectar la reacción álcali-sílice. En la primera parte se analizan los resultados obtenidos por cada método; se hace énfasis en los puntos que aportan información que permite predecir el comportamiento de los agregados en campo. Además, se señalan los puntos que son complementarios a los demás métodos.

En la segunda parte, siguiendo la secuencia de decisiones de campo, y utilizando los resultados de todos los métodos ejecutados, se determina cuáles agregados son deletéreos y cuáles presentan características inocuas.

A. Resultados por método.

ASTM C 295. Examinación petrográfica.

De los resultados proporcionados en el capítulo III sobre la examinación petrográfica de las muestras, dos puntos son muy importantes.

1. Todos los agregados de origen andesítico (El Milagro, Lagrecosa, Samperio y la Mexicana) se consideran potencialmente deletéreos, debido a la cantidad y tipo de sílice reactiva que contienen.

2. Los dos bancos de agregados de origen basáltico (Tribasa y Tepetzotlán) presentan características inocuas. Sin embargo, dicha inocuidad debe señalarse con reserva pues ambos bancos contienen sílice amorfa, pero con una composición básica que dificulta predecir si el material es reactivo o no. Esta ambigüedad se debe a que en la evaluación de este tipo de reactividad la sílice amorfa, presente en rocas de composición básica, sólo en casos aislados se ha detectado como potencialmente reactiva.

Adicionalmente, se observa que en el caso de los materiales andesíticos, la sílice reactiva es más abundante en aquellos depósitos que contienen material pumítico, ya que estas rocas contienen un porcentaje mayor a 70 % de este tipo de componente.

Por tanto, los resultados del examen petrográfico no son definitivos, aunque muestran un panorama general de cómo pueden comportarse los agregados en campo. El aspecto químico requiere un análisis más detallado, ya que cuatro de los bancos se identifican como potencialmente reactivos y en los restantes su potencialidad esta en

duda. Dado que el método petrográfico no estima grados de potencialidad, sólo los identifica, es necesario conocer los resultados de métodos de prueba que confirmen y cuantifiquen dicho potencial (ASTM C 289 Método químico, CSA CAN3-23.2-XXC Método canadiense y ASTM C 227 Método de barras de mortero).

ASTM C 289. Método químico.

Los resultados del método químico aportan más información acerca de los agregados. De acuerdo con este método, todos los agregados (excepto la arena de Tepetzotlán) son considerados deletéreos o potencialmente deletéreos (figs 11 a 16). Sin embargo, los agregados que tienen potencialidad deletérea se encuentran muy cercanos a la línea que separa a los agregados deletéreos de los potencialmente deletéreos señalada por la ASTM, y esta potencialidad tiende más a ser deletérea.

Se observa que en algunos bancos, la grava es potencialmente deletérea y la arena es deletérea o viceversa, esto parecería contradictorio pues se trata del mismo material, pero ocurre por la cercanía de los resultados a la frontera señalada en el párrafo anterior.

El agregado de Tepetzotlán presentó inocuidad en la arena y potencialidad deletérea en la grava. Sin embargo estos valores están nuevamente cercanos a la línea divisoria de estas dos zonas, por lo que, bajo este método se sospecha que el material es inocuo.

De esta manera, los resultados del método químico continúan siendo no definitivos y señalan que sólo hay un banco (Tepetzotlán) que puede considerarse, con reserva, como inocuo.

CSA CAN3-23.2-XXC. Método canadiense.

En las gráficas que muestran las expansiones de las barras de mortero elaboradas de acuerdo con este método (fig 17) se observa que todos los agregados, cuando se combinan con cemento portland de bajo contenido de álcalis (Anahuac Tipo II) y alto contenido de álcalis (Tolteca Tipo I) pueden ser considerados potencialmente deletéreos, porque después de 14 días originan expansiones mayores al límite que el método señala para identificar expansiones de este tipo (0.20 %), independientemente del contenido de álcalis de los cementos.

Para todas las combinaciones agregado-cemento puzolánico (Tolteca, planta Atotonilco) hay una reducción considerable en las expansiones. Estas, después de 14 días están por debajo del límite establecido por el método (< 0.10 %) que separa a las expansiones inocuas de las expansiones no concluyentes.

Al ejecutar nuevamente el método, incrementando el contenido de agua de las mezclas agregado-cemento puzolánico, las expansiones de los especímenes continúan

por debajo del límite permisible a los 14 días ($< 0.10\%$, figs 18 y 19). Sólo hay dos bancos en que las expansiones se encuentran cercanos al límite, pero sin llegar a la zona de resultados no concluyentes ($0.10\% < \text{expansiones} < 0.20\%$, fig 19). Sin embargo recientemente se ha sugerido que el límite permisible a los 14 días se incremente de 0.10 a 0.15% ⁽³⁾ y bajo esta condición esas combinaciones pueden ser consideradas inocuas.

Bajo este método, la puzolana incluida en el cemento puzolánico demostró ser efectiva para prevenir expansiones excesivas debidas a la reacción álcali-sílice.

ASTM C 227. Método de barras de mortero.

Los resultados de este método muestran que los agregados procedentes del banco Tribasa son reactivos con los álcalis y las expansiones originadas con un cemento de alto contenido de álcalis son deletéreas para los concretos. Sin embargo, la combinación de esos mismos agregados con el cemento de bajo contenido de álcalis o con el cemento puzolánico utilizado dan origen a expansiones suficientemente pequeñas que no causan daños en las estructuras.

Los agregados del banco Tepetzotlán son inocuos, pues las combinaciones de los agregados de este banco con cemento de alto contenido de álcalis y con cemento puzolánico dieron origen a contracciones no deletéreas para el concreto (menores a 0.10% a 6 meses).

Las andesitas, al combinarse con cemento de alto contenido de álcalis dan origen a expansiones que permiten considerarlas como no deletéreas al concreto. Al combinarse con un cemento con bajo contenido de álcalis o con un cemento puzolánico originan expansiones muy pequeñas e incluso contracciones no dañinas al concreto.

En general, los resultados de este método demuestran que sólo hay un banco que produce acciones deletéreas al concreto al combinarse con un cemento de alto contenido de álcalis: Tribasa. Demuestran también que las andesitas no tienen problemas de reactividad y confirman que el basalto de Tepetzotlán es completamente inocuo.

B. Resultados generales.

Los resultados de los métodos de prueba analizados en forma aislada no permiten determinar en forma definitiva la potencialidad deletérea de los agregados, es necesario para ese efecto el análisis global de los resultados, pues cada uno de los métodos de prueba aporta información que hace que se complementen entre sí.

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos en cada uno de los métodos. A partir de ella pueden derivarse algunos puntos importantes sobre la

potencialidad deletéreas de las muestras.

BANCO		RESULTADOS DE LOS METODOS DE PRUEBA							
		ASTM C 295 EXAMINACION PETROGRAFICA	ASTM C 289 METODO QUIMICO	CSA CAN3-23.2- XXC METODO CANADIENSE *			ASTM C 227 METODO DE BARRAS DE MORTERO *		
				T-I	T-II	PUZ.	T-I	T-II	PUZ.
TRIBASA	GRAVA	INOCUO	DELETEREO	POT. DEL.	POT. DEL.	IN.	DEL.	IN.	IN.
	ARENA	INOCUO	DELETEREO						
	GRAVA	DELETEREO	DELETEREO	POT. DEL.	POT. DEL.	IN.	IN.	IN.	IN.
	ARENA	DELETEREO	DELETEREO						
LAGRECOSA	GRAVA	DELETEREO	DELETEREO	POT. DEL.	POT. DEL.	IN.	IN.	IN.	IN.
	ARENA	DELETEREO	POTENCIALMENTE DELETEREO						
SAMPERIO	GRAVA	DELETEREO	POTENCIALMENTE DELETEREO	POT. DEL.	POT. DEL.	IN.	IN.	IN.	IN.
	ARENA	DELETEREO	DELETEREO						
LA MEXICANA	GRAVA	DELETEREO	POTENCIALMENTE DELETEREO	POT. DEL.	POT. DEL.	IN.	IN.	IN.	IN.
	ARENA	DELETEREO	DELETEREO						
TEPOTZOTLAN	GRAVA	INOCUO	POTENCIALMENTE DELETEREO	POT. DEL.	POT. DEL.	IN.	IN.	IN.	IN.
	ARENA	INOCUO	INOCUO						

* En estos métodos se ensayaron gravas y arenas del mismo banco mezcladas en los morteros.

T-I = Mortero hecho con cemento Tipo I (Alto en álcalis)

T-II = Mortero hecho con cemento Tipo II (Bajo en álcalis)

PUZ. = Mortero hecho con cemento puzolánico

Tabla 18. Resumen de los resultados de los métodos de prueba ejecutados en el estudio.

Puede observarse en la tabla que los resultados de los diferentes métodos no coinciden al calificar a las muestras de agregado. La evaluación petrográfica y los métodos de prueba acelerados (método químico y método canadiense) muestran que existe cierto potencial reactivo en cada uno de los bancos, aunque el método C 227, a largo plazo, confirma que ese potencial no es suficiente para causar acciones deletéreas en los concretos. Estos resultados son lógicos debido a la agresividad de los métodos de prueba acelerados y justifican en cierta forma el por qué algunos investigadores señalan que los resultados de los métodos acelerados deben tomarse con reserva al evaluar la potencialidad reactiva de los agregados.

Si el método de prueba ASTM C 227 se toma como definitivo en la evaluación de los agregados, los resultados demuestran que sólo hay una combinación deletérea, el basalto de Tribasa con un cemento de alto contenido de álcalis. Además, todas las andesitas ensayadas no tienen problemas de reactividad con los álcalis de los cementos empleados. El basalto de Tepotzotlán es completamente inocuo y la mayoría de los métodos lo confirman.

De particular interés es el caso del banco Tribasa, pues a pesar de que el basalto explotado ahí es de composición básica, los agregados resultan reactivos; y son muy pocos los agregados con estas características (rocas básicas) que han demostrado ser reactivos con los álcalis del concreto.

Otro de los puntos importantes vislumbrado al ejecutar los métodos es que la puzolana empleada en el cemento puzolánico utilizado en este estudio es de muy buena calidad (8.5 MPa de actividad puzolánica con cal ⁽³¹⁾) y al parecer el contenido de puzolana en el cemento (24 % aproximadamente) es el adecuado para inhibir las expansiones provocadas por una reacción álcali-sílice. De acuerdo con el estudio efectuado a esta puzolana, ⁽³¹⁾ su reducción en la expansión de mortero a 14 días es de 85 %, que es mayor a lo especificado en la norma ASTM C 618 (75 % mínimo), por lo que se reitera la efectividad de la puzolana integrada en este cemento para inhibir la reacción álcali-sílice. Este punto es más importante aún si se toma en cuenta que la mayoría de los cementos que circulan en el mercado dentro del Distrito Federal y su área metropolitana son cementos puzolánicos. Se sugiere para futuras investigaciones el probar la efectividad de las puzolanas empleadas en la elaboración de los cementos puzolánicos diferentes al ocupado en este estudio.

En futuras investigaciones se puede determinar también la sensibilidad de los métodos ejecutados, y la implementación de nuevos métodos de prueba. Además pueden determinarse los grados de reactividad de las andesitas de bancos diferentes a los estudiados aquí.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De todo lo expuesto anteriormente se derivan las siguientes conclusiones:

1. La reacción álcali-agregado es una reacción química entre los iones hidróxilo (OH^-) asociados con los álcalis (Na_2O y K_2O) del cemento u otras fuentes y ciertas fases minerales que pueden presentarse en los agregados utilizados en el concreto.

2. Para que una reacción álcali-agregado se presente deben cumplirse simultáneamente tres condiciones:

- a) Los agregados deben contener rocas y minerales reactivos con los álcalis, en las cantidades que sean más desfavorables de acuerdo con su naturaleza.
- b) La solución de poro del concreto debe tener suficiente proporción de álcalis para generar una reacción deletérea con esos agregados, y
- c) La estructura debe prestar servicio en condiciones tales que representen un alto contenido de humedad en el concreto (>80% de humedad relativa), ya sea en forma permanente o alternada con periodos de secado.

3. Una vez iniciado el mecanismo deletéreo de la reacción álcali-agregado, no puede detenerse si no desaparecen los factores (alguno o todos) que le dieron origen (humedad, álcalis, agregado reactivo).

4. En la ciudad de México y su área metropolitana existen rocas volcánicas vítreas y sus tobas que se caracterizan por tener alto contenido de sílice que puede ser reactiva con los álcalis de la solución de poro del concreto.

5. Las rocas calizas que se encuentran disponibles para la fabricación de agregados para concretos en el área metropolitana de la ciudad de México son calizas microcristalinas que contienen poco o nada de material calcáreo dolomítico, identificado como susceptible de participar en la reacción álcali-carbonato, por lo que la probabilidad de que se presente una reacción álcali-carbonato es despreciable.

6. Los cementos disponibles en el Distrito Federal y zonas circunvecinas son cementos portland tipo I y II y cementos portland puzolana. Los contenidos de álcalis de

las nueve muestras evaluadas, tomadas de los cementos existentes en el mercado, varían de 0.24 a 0.92 por ciento, cuatro de las cuales tienen contenidos superiores a 0.6 por ciento.

7. Los agregados pétreos andesíticos y basálticos utilizados para la fabricación de concreto y ensayados en este estudio, en su mayor parte resultaron reactivos y una combinación cemento agregado en particular (agregado de TRIBASA con cemento de alto contenido de álcalis) puede provocar acciones deletéreas en el concreto. Por tanto, las estructuras que hayan sido construidas con ese agregado y con un cemento de alto contenido de álcalis, corren el riesgo de sufrir una reacción álcali-sílice con efectos deletéreos si están rodeadas por un ambiente húmedo o son sometidas a períodos de humedecimiento y secado.

8. Los cementos con bajo contenido de álcalis y puzolánicos existentes en el Distrito Federal pueden ser efectivos para inhibir una reacción álcali-sílice en el seno del concreto cuando se utilizan agregados reactivos. En general, las medidas que deben tomarse cuando se utilizan agregados reactivos son:

- a) Limitar el contenido total de álcalis del cemento a 0.6 % en mezclas en donde el contenido de cemento sea menor de 500 kg/m^3 , y en mezclas con contenidos de cemento mayor limitar el contenido de álcalis de las mezclas a 3 kg/m^3 . Estas medidas ayudan a disminuir la generación de una posible reacción.
- b) Mantener en estado seco al concreto.
- c) Utilizar procedimientos constructivos y materiales que permitan disminuir el contenido de agua de las mezclas y la permeabilidad del concreto.
- d) Utilizar una puzolana adecuada de acuerdo con el diseño de la mezcla y que sea efectiva para inhibir la reacción álcali-agregado.

9. Los métodos de prueba acelerados aplicables para detectar la reacción álcali-sílice son muy agresivos, pero por esa misma característica puede asumirse que todos los materiales que sean aprobados bajo su ejecución pueden ser considerados inocuos (en el caso de los agregados) o como inhibidores de la reacción álcali-sílice (en el caso de los cementos). Es recomendable que si los agregados no cumplen con los requisitos especificados en los métodos de prueba acelerados, se utilice el método de prueba de barras de mortero con resultados a 3 ó 6 meses para verificar el potencial reactivo de las mezclas.

Para avanzar en el conocimiento y prevención de la reacción álcali-silice dentro de la región en estudio e incluso a nivel nacional, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Aún cuando los agregados ensayados en este estudio fueron seleccionados como representativos de aquellos que son explotados en la ciudad de México y poblaciones circunvecinas, se sugiere que otros agregados más de la región sean evaluados para determinar si son susceptibles a una reacción álcali-silice. Esto es justificable por el hecho de que la mayoría de los agregados ensayados resultaron reactivos y sólo un banco provocó expansiones deletéreas.

2. Se sugiere también el verificar el contenido de álcalis de un mayor número de cementos, pues éste puede variar dependiendo de la producción de las plantas cementeras. Además se recomienda el probar la efectividad de las puzolanas empleadas en la elaboración de los cementos puzolánicos diferentes al ocupado en este estudio.

3. Con el fin de tener más información de los métodos de prueba, y su aplicabilidad a los agregados mexicanos, se sugiere el determinar la sensibilidad de los mismos. Además, pueden ejecutarse nuevos métodos que han comenzado a estudiarse en diferentes partes del mundo, tales como: el método de prismas de concreto, el método acelerado de prismas de concreto y el método de barras en autoclave.

4. Aunado a la parte experimental, se recomienda el desarrollar un programa de detección de estructuras que hayan sido construidas con agregados reactivos y con cementos de altos contenidos de álcalis con el fin de evitar acciones deletéreas o controlarlas en el caso de que el mecanismo de reacción comience. Esto permitiría también el correlacionar los resultados de los métodos experimentales con el comportamiento de los agregados en campo.

5. Conociendo la gravedad del problema, no es aventurado también el recomendar que en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y en los reglamentos regionales se dicten medidas que ayuden a prevenir cualquier tipo de reacción álcali-agregado.

Las medidas propuestas requieren de gran trabajo por parte de las autoridades y personas involucradas en la construcción, pero los beneficios que pueden aportar justifican en gran medida ese trabajo.

REFERENCIAS

1. Kumar, Mehta P., Monteiro, Paulo J.M., **CONCRETE STRUCTURE, Properties and Materials**, 2a. ed, U.S.A., Ed. Prentice Hall, 1993, 548 pp.
2. Mather, B. y Verbeck, G., **Reacción entre los agregados del concreto y los álcalis del cemento**, Memorias de la XII Junta Regional del Instituto Americano del Concreto, México D. F., Noviembre 1959, pp 9-21.
3. CANMET, GREGI, I.I. UANL Y CONACYT, **Petrografía y Reacción Alkali-Agregado. Manual del curso**, Monterrey, México, Junio 27-Julio1, 1994, 576 pp.
4. ASTM, **Special Technical Publication 930: Alkalies in Concrete**, Vance h. Dodson, W.R. Grace & Company editor, Philadelphia, Pa., 1986, 92 pp.
5. Uribe Afif, Roberto, **Análisis petrográfico de los concretos del Puente Tula, Hidalgo y su reactividad álcali-agregado**, Reporte técnico, México, 1992, 14 pp.
6. Mena Ferrer, Manuel, **Manual de Tecnología del Concreto. Sección 3**, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, LIMUSA, Noriega editores, México, 1994, 382 pp.
7. Mena Ferrer, Manuel, **Manual de Tecnología del Concreto. Sección 1**, Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería, UNAM, LIMUSA, Noriega editores, México, 1994, 258 pp.
8. Mena Ferrer, Manuel, **Reacción álcali-sílice en el concreto: causas, efectos y medios de prevención**, Revista IMCYC, Vol. 21, Num. 148, Agosto 1983, pp 17-31.
9. Palmer, D. **Alkali-aggregate reaction in Great Britain- the present position**, Concrete, March 1981, pp 24-27.
10. Cottier Caviedes, Juan L., **Efectos de la reacción álcali-agregado en el concreto**, Memoria del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto: Durabilidad, Raymundo Rivera Villarreal editor, Monterrey México, Octubre 1993, pp 14-30.
11. Cement and Concrete Association, Conference and Training Center, **Minimising the Risk of Alkali-Silica Reaction in Concrete - Guidance Notes**, TDH 9448, CGLI Advanced Concrete Technology Course, Course Notes 142-144D, London, October 1981, 17 pp.

12. Murdock, L.J., et al, **CONCRETE MATERIALS AND PRACTICE**, 6a. ed., Great Britain, eds. Edward Arnold, 1956, 470 pp.
13. Hobbs, Don W., **Countering alkali-silica reaction in concrete. Experience in the United Kingdom**, Concrete Construction, November 1989, pp 948-950.
14. Miyagawa, T. **Durability design and repair of concrete structures: chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction**, Magazine of Concrete Research, 43, No. 156, 1991, pp 155-170.
15. Ropke, John C., **CONCRETE PROBLEMS: CAUSES AND CURES**, U.S.A., Ed. McGraw-Hill, 1982.
16. Fournier, B., & Bérubé, M.A., **Petrography and Alkali-Aggregate Reaction. Course Notes**, Monterrey México, Junio 27 -Julio 1, 1994.
17. Neville, A.M., **PROPERTIES OF CONCRETE**, London, eds. Sir Isaac Pitman & Sons, 1993, 532 pp.
18. McConnell, D., et al, **Petrology of Concrete Affected by Cement-Aggregate Reaction**, The Geological Society of America Engineering Geology (Berkeley) Volume, November 1960, pp 225-250.
19. Cement and Concrete Association, Conference and Training Center, **Alkali-Silica Reaction (Alkali-Aggregate Reaction)**, TDH 9337, CGLI Advanced Concrete Technology Course, Course Notes 142-144D, London, October 1981, 14 pp.
20. Lea, F.M., **THE CHEMISTRY OF CEMENT AND CONCRETE**, 2a. ed., Great Britain, eds. Edward Arnold, 1956, 637 pp.
21. ACI Comité 201, **Gula para la Durabilidad del Concreto, Suplemento Mexicano del Informe del Comité ACI 201**, ACI Sección México -Capital, México, Noviembre 1989, 50 pp.
22. Uribe Afif, Roberto, **Reactividad álcali-sílice y álcali-carbonato. Condiciones generales de los agregados en la República Mexicana**, Revista Construcción y Tecnología, Diciembre 1991, pp 32-33.
23. IMCYC, **Cemento Portland: fabricación, propiedades y empleo**, folleto.

24. IMCYC, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Traducción y adaptación del libro: *Design and Control of Concrete Mixtures*, por el Ing. Manuel Santiago Briangas, 1a. edición, México, 1992, 230 pp.
25. Staff-Portland Cement Assosiation, ***PROYECTO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO***, Ed. Limusa, México, 1978, 163 pp.
26. ASTM C 295, *Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*, Annual Book of ASTM Standards, 04.02, Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A., 1991, 824 pp.
27. ASTM C 289, *Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method)*, Annual Book of ASTM Standards, 04.02, Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A., 1991, 824 pp.
28. Bérubé, M.A. & Fournier, B. *Testing for Alkali-Aggregate Reactivity in Concrete*, Memoria del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto: Durabilidad, Raymundo Rivera Villarreal editor, Monterrey México, Octubre 1993, pp 55-78.
29. Canadian Standard Association, Draft version of CSA CAN3-A23.2-XXC Appendix A, *Standard Test Method for Acelerated Detection of Potentially Deleterious Expansions of Mortar Bars Due Alkali-Silica Reaction*, Draft No.3 of January 25, Rexdale, Ontario, 1990.
30. ASTM C 227, *Standard Test Method for Potential Alkali-Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)*, Annual Book of ASTM Standards, 04.02, Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A., 1991, 824 pp.
31. Rodríguez Camacho Rosa Elba, *Estudio de Puzolanas Naturales Mexicanas, Determinación de su Velocidad de Reacción*, Tesis de Maestría, ESFM, IPN, Diciembre, 1994, México.