

Evaluación de la metodología de ensayo acelerado de barras de mortero ASTM C 1260 para detectar agregados potencialmente reactivos y las medidas de mitigación de la reacción álcali-sílice ASTM C 1567

Assessment of the ASTM C 1260 mortar bar accelerated test methodology to detect potentially reactive aggregates and the ASTM C 1567 alkali-silica reaction mitigation measures

STEFANNY BOLÍVAR MURCIA¹ - NANCY TORRES²

1. Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil. Magíster en Estructuras y doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales.

stefanny.bolivar-m@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/01/2018 Aceptado: 28/02/2018

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

La reacción álcali-sílice se define como un fenómeno producido por los álcalis (sodio o potasio) del cemento, los cuales reaccionan con la sílice presente en ciertos agregados, formando un gel que en condiciones de humedad genera microfisuras y esfuerzos internos. En el presente artículo se exponen los resultados de un proyecto de investigación en el que se evaluó la potencial reactividad de tres agregados del territorio colombiano en combinación con dos tipos de cementos y dos relaciones agua-cemento, con el ensayo ASTM C 1260 de barras de mortero. De las muestras reactivas, se evaluó la efectividad de materiales cementantes para mitigar la reacción álcali-sílice, en el ensayo ASTM C 1567 de barras de mortero. Finalmente se analizó el comportamiento mecánico de muestras de mortero, como la resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad, respecto a probetas con agregados reactivos y no reactivos, concluyendo que la reacción álcali sílice-aumenta a medida que aumenta la relación agregado-cemento y ésta depende de la composición mineralógica de cada agregado.

Por otro lado, los materiales mitigantes utilizados, como la ceniza volante F, microsílíce y metacaolín, son competentes para reducir la reacción álcali-sílice en cierta proporción de remplazo; las propiedades mecánicas más afectadas por la reacción álcali-sílice son el módulo elástico y la resistencia a flexión, y la resistencia a compresión se ve afectada en menor porcentaje a lo largo del tiempo.

Palabras claves: reacción álcali-sílice, material cementante mitigante, patología.

Abstract

The alkali-silica reaction is defined as a phenomenon produced by the alkali (sodium or potassium) of the cement, which reacts with the silica present in certain aggregates, forming a gel, which under conditions of humidity generates micro cracks and internal stresses. This paper presents the results of a research project that assessed the potential reactivity of three aggregates of the Colombian territory in combination with two cement types and two cement water ratios according with ASTM C 1260 mortar test bars. From the reactive samples, the alkali-silica reaction was assessed through the effectiveness of cementing materials.

Finally, the mechanical behavior was analyzed: the resistance to compression and flexion and elastic properties. By comparing the answers, several conclusions were reached. The alkali silica reaction increases as the aggregate-cement ratio increases, and it depends on the mineralogic composition. Mitigating materials such as fly ash F, microsílíce, and metacaolin are valid to reduce the alkali-silica reaction based on the amount of replacement. The most affected mechanical properties affected by the alkali silica reaction are elastic modulus and flexural strength; compressive strength is affected but at a lesser degree.

Keywords: alkali-silica reaction, cementing materials, pathology.

INTRODUCCIÓN

En Colombia se han encontrado estructuras de concreto con posible presencia de la reacción álcali-sílice (RAS), como la presa de El Cercado, sobre el río Ranchería, la presa de Ituango y la presa del río Tona. Estructuras de grandes volúmenes de concreto en las que los agregados generalmente proceden de zonas próximas a la obra, lo que puede implicar el empleo de agregados inadecuados, que con el paso del tiempo conducen a expansiones. En el 2009, Ingeominas reveló 16 puntos críticos donde hay agregados que podrían reaccionar con el concreto (tabla 1).

Osuna (2009) define la RAS como el fenómeno producido por los álcalis (sodio o potasio) del cemento, los cuales reaccionan con la sílice presente en ciertos agregados, formando un gel que en condiciones de humedad genera microfisuras y esfuerzos internos en el concreto. Se ve la necesidad de que las autoridades competentes de supervisión de obra exijan una caracterización confiable de agregados, para construir obras durables y funcionales.

Después de que se identificó la reacción álcali-sílice como la causa de muchas fallas del concreto, como agrietamientos y, en casos avanzados, grandes fisuras y descascamiento, se encontró que el uso de adiciones minerales en remplazo parcial del cemento reduce los efectos de la RAS. Entre las adiciones para prevenir la RAS, Marval, Cline, Burke, Rollings, Sherma y Grene (2002) recomiendan utilizar ceniza volante tipo F en 40-50 % de remplazo parcial del cemento y humo de sílice en un 10 % de remplazo. En general, estas adiciones mejoran la calidad del concreto. Por lo mismo, la correcta proporción de remplazo del cemento es importante, con el fin de reducir los costos de construcción y poder utilizar efectivamente, tanto como sea posible, las fuentes de agregados reactivos.

Por otro lado, en la industria de producción de concreto hay necesidad de mejorar o modificar los procedimientos de evaluación de los agregados para una clara y confiable clasificación de éstos, en condiciones controladas, con métodos rápidos y simples. Actualmente, existen tres métodos estandarizados para la determinación de la RAS: los petrográficos, los químicos y las pruebas de expansión, los cuales se han estudiado en varios países.

En el presente artículo se evalúa, en la etapa 1, la metodología de ensayo estándar para determinar la po-

tencial reactividad álcali-sílice de los agregados (método de barras de mortero) ASTM C 1260, para clasificar agregados potencialmente reactivos de tres zonas de Colombia. Después en la etapa 2, se estudian dos de las muestras reactivas de la primera etapa, se valoran medidas de mitigación de la reacción álcali-sílice por medio del remplazo de cemento por adiciones cementantes (método acelerado de la barra de mortero) ASTM C 1567, y finalmente se hacen ensayos mecánicos, como ensayo de compresión de cilindros ASTM C 39, ensayo de flexión de vigas ASTM C78 y ensayo de módulo de elasticidad ASTM C 469, tanto a muestras reactivas como a no reactivas.

Tabla 1

Tabla de fuentes de agregados reactivos en Colombia

Norma técnica colombiana NTC 174 (quinta actualización)		
N.º	Terreno	Rocas fuentes de agregados
1	Garzón	Intrusivos granitoides, chamoquitas, migmatitas, granulitas, meises félsicos
2	Payandé	Intrusivos granitoides, riolitas, traquitas, andesitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas
3	Cajamarca	Intrusivos granitoides, neises, cuarcitas, mármoles
4	Cauca Romeral	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos toleíticos, neises, esquistos, liditas o cherts
5	Dagua	Plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts
6	Cañasgordas	Basaltos pobres en <i>k</i> , liditas, calizas
7	Baudó	Liditas y calizas
8	Sinú	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos, tobas, liditas
9	Buritaca	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos, tobas, liditas
10	San Jacinto	Calizas, liditas, areniscas calcáreas
11	San Lucas	Granitoides, lavas riolíticas y riodacitas, tobas, neises, cuarzos feldespáticos
12	Santander	Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, mármoles, calizas
13	Perijá	Granitoides, riolitas, tobas riolíticas, calizas
14	Sierra Nevada	Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, calizas
15	Baja Guajira	Riolitas, espilitas de abajo Al, esquistos félsicos, mármoles, calizas
16	Cosinas	Granitoides, flujos riodacíticos, neises félsicos, mármoles, calizas

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiales

Para el desarrollo del programa experimental se usaron tres agregados finos del territorio colombiano: Tumaco (TU), de Nariño; Tunjuelo (BO), de Bogotá, y Cemex (CE), de origen desconocido (tabla 2).

Tabla 2
Composición química de agregados en estudio

Elemento o compuesto	M-Tumaco (% en peso)	XRF-5534 M-Bogotá (% en peso)	XRF-5534 M-Cemex (% en peso)
SiO ₂	61,98 %	91,05 %	75,56 %
Al ₂ O ₃	16,36 %	6,44 %	11,96 %
Fe ₂ O ₃	7,08 %	0,57 %	2,75 %
CaO	6,00 %	0,25 %	2,24 %
Na ₂ O	3,77 %	0,14 %	3,10 %
MgO	2,30 %	0,15 %	0,99 %
K ₂ O	1,18 %	0,53 %	2,39 %
TiO ₂	0,69 %	0,23 %	0,31 %
P ₂ O ₅	0,18 %	0,17 %	0,15 %
MnO	0,12 %	170 ppm	0,15 %
Ba	0,12 %	0,06 %	0,10 %
SO ₃	0,07 %	0,30 %	0,11 %
Cl	0,03 %	0,05 %	0,05 %

Tabla 3
Composición química del cemento tipo III y tipo I

Elemento o compuesto	Cemento tipo III (% en peso)	Cemento tipo I (% en peso)
CaO	61,01 %	64,1 %
SiO ₂	20,91 %	19,37 %
SO ₃	5,87 %	4,13 %
Al ₂ O ₃	4,78 %	5,21 %
Fe ₂ O ₃	3,63 %	2,79 %
K ₂ O	1,05 %	0,25 %
MgO	0,91 %	3,19 %
Na ₂ O	0,68 %	0,14 %
TiO ₂	0,31 %	0,47 %
P ₂ O ₅	0,30 %	0,06 %
Mn ₂ O ₃	0,27 %	--
Ba	0,09 %	0,07 %
SrO	0,09 %	0,08 %
Densidad	3,08 g/cm ³	2,88 g/cm ³
Finura	4252 cm/g	4963 cm ² /g

Igualmente, se utilizaron dos tipos de cemento: tipo I (CCOM) y tipo III (CCON). El cemento tipo I corresponde a un cemento comercial de bolsa del interior del país, de uso general, y el cemento tipo III corresponde a un tipo concretero de la misma cementera. En la tabla anterior se muestran su composición química y algunas de sus propiedades físicas (tabla 3).

Las adiciones cementantes utilizadas como medida de mitigación corresponden a metacaolín (MK) de marca Corona, ceniza volante (CV) de Termozipa y microsílíce (SF) de Toxement (tabla 4).

Tabla 4
Composición química de materiales cementantes usados

Elemento o compuesto	Ceniza volante (% en peso)	Metacaolín (% en peso)	Microsílíce (% en peso)
SiO ₂	58,12 %	57,48 %	88,63 %
Al ₂ O ₃	22,99 %	38,53 %	0,53 %
Fe ₂ O ₃	4,49 %	1,36 %	3,26 %
CaO	1,54 %	0,17 %	0,40 %
K ₂ O	1,29 %	0,63 %	3,11 %
SO ₃	1,18 %	0,05 %	0,98 %
TiO ₂	1,03 %	1,28 %	0,01 %
P ₂ O ₅	0,72 %	0,03 %	0,09 %
MgO	0,56 %	0,22 %	1,67 %
Na ₂ O	0,40 %	0,10 %	0,96 %

Estudio experimental

La primera fase consistió en la puesta en marcha del ensayo especificado en la norma ASTM C 1260, clasificando las muestras de tal manera que si la expansión a los 14 días es menor que el 0,10 % es considerada inocua, si al día 14 la expansión está entre el 0,10 y 0,20 % es considerada inconclusa, y si la expansión a los 14 días es mayor de 0,20 % es considerada reactiva.

Se midió la expansión de barras de mortero usando tres tipos de agregados (Tunjuelo, Cemex y Tumaco), en combinación con los cementos (tipos I y III), con dos relaciones agua-cemento (A/C) 0,47 (estándar) y una variación a la norma con una relación agua-cemento de 0,60, con fines comparativos. De la misma manera, se realizaron ensayos a compresión a cubos de mortero

ASTM C 109, con curado normal y la influencia del hidróxido de sodio.

La segunda fase consistió en evaluar las combinaciones agregado-cemento que mostraron ser reactivos y se procedió a realizar el ensayo ASTM C 1567, con dos porcentajes de remplazo de los siguientes materiales mitigantes: ceniza volante, metacaolín y microsílce, midiendo la expansión de las barras de mortero a 14 días, tal como lo establece la norma, donde el criterio de aceptación de las muestras en estudio es el siguiente: si la expansión a los 14 días es menor que el 0,10 % es considerada inocua; si al día 14 la expansión está entre el 0,10 y 0,20 % es considerada inconclusa, y si la expansión a los 14 días es mayor de 0,20 % es considerada reactiva.

Se hicieron ensayos de compresión ASTM C 39 y de módulo elástico a cilindros de mortero ASTM C 469, e igualmente ensayos de flexión ASTM C 78, a las muestras reactivas, y a las muestras que contenían el mitigante más eficiente de los nombrados antes a una edad de 28 a 90 días. Por otro lado, se realizó el ensayo petrográfico a dos de las muestras que dieron reactivas en la etapa 1.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

Determinación de la reactividad de los agregados

Posteriormente, se presenta para cada una de las 12 mezclas elaboradas en la etapa 1 las expansiones registradas a 14 días, las cuales se midieron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C1260 (tabla 5).

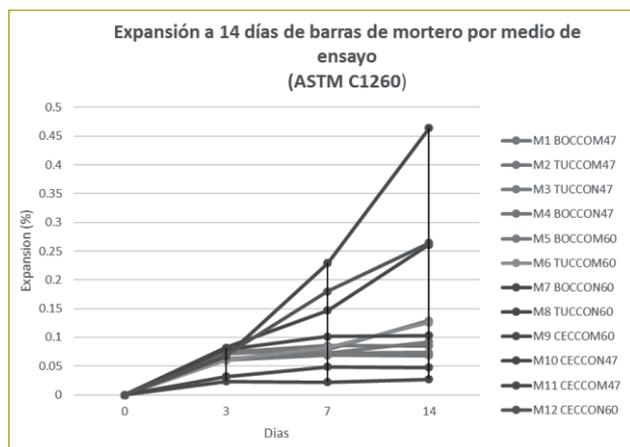


Figura 1. Expansión según ASTM 1260 para probetas elaboradas con las mezclas de la etapa 1.

Tabla 5

ASTM C 1260. Expansión en porcentaje para mezclas de la etapa I

Agregado	Expansión (%)			
	0	3	7	14
BOCCOM47	0,00 %	0,06 %	0,07 %	0,07 %
BOCCON47	0,00 %	0,07 %	0,09 %	0,08 %
BOCCON60	0,00 %	0,08 %	0,10 %	0,10 %
BOCCOM60	0,00 %	0,08 %	0,07 %	0,07 %
TUCCOM60	0,00 %	0,06 %	0,08 %	0,13 %
TUCCON60	0,00 %	0,07 %	0,23 %	0,46 %
TUCCOM47	0,00 %	0,06 %	0,07 %	0,09 %
TUCCON47	0,00 %	0,07 %	0,08 %	0,13 %
CECCOM60	0,00 %	0,02 %	0,02 %	0,03 %
CECCON47	0,00 %	0,08 %	0,15 %	0,26 %
CECCOM47	0,00 %	0,03 %	0,05 %	0,05 %
CECON60	0,00 %	0,07 %	0,18 %	0,26 %

Se utilizaron los criterios de evaluación descritos anteriormente; estas mediciones se hicieron para tres especímenes de cada una de las mezclas en estudio.

Para una mejor visualización, se muestra un resumen de las expansiones presentadas a 14 días, en los especímenes de las 12 mezclas de la etapa 1, expuestas a la solución NaOH A 80 °C (figura 1).

Las combinaciones para el agregado de Tunjuelo (muestras 1, 4, 5, 7) con los dos tipos de cemento en estudio y las dos relaciones agua-cemento presentan expansiones relativamente bajas a 14 días, siendo del orden de 0,07 a 0,10 % en promedio. Mientras que las combinaciones para el agregado de Tumaco (muestras 2, 3, 6, 8) para lecturas a 14 días, las expansiones oscilan entre 0,13 y 0,46 %, indicando que este agregado es potencialmente reactivo frente a una combinación específica de a/c de 0,60. Por otro lado, para el agregado de Cemex (muestras 9, 10, 11, 12) las expansiones varían entre 0,08 a 0,26 %, indicando también una combinación potencialmente reactiva para ambos cementos en las dos relaciones de agua-cemento de 0,47 y 0,60.

Evaluación de la eficiencia de las adiciones cementantes como control de las expansiones

Se utilizó el ensayo ASTM C 1567 para evaluar los efectos de la ceniza volante de clase F, microsílce y metacaolín, como material de control a las expansiones

nes. Se eligieron dos combinaciones de los agregados que presentaron reactividad de la etapa 1 las mezclas 8-(TUCCON60) altamente reactivo y 10-(CCECON47) altamente reactivo. A continuación se presentan los porcentajes de remplazo de cemento evaluadas para cada una de las adiciones cementantes estudiadas (tabla 6).

Tabla 6
Porcentaje de remplazo de cemento

Adición cementante	Porcentaje de remplazo en peso de cemento.
Ceniza volante	15 y 20 %
Metacaolín	5 y 10 %
Microsilíce	10 y 20 %

A continuación se presenta la discusión de los resultados para cada una de las mezclas elaboradas con los agregados Cemex y Tumaco, respectivamente:

Para el agregado Cemex la ceniza volante tipo F, en remplazo parcial de cemento de 15 y 20 %, disminuye la expansión entre un 82 -83 %, respectivamente. Por otro lado, un remplazo de 10 % de microsilíce reduce la expansión en un 80 % y un remplazo de metacaolín del 20 % disminuye la expansión en un 80%. Se puede concluir que los tres materiales cementantes en los rangos seleccionados para el agregado Cemex son efectivos, llegando a una reducción de expansión similar.

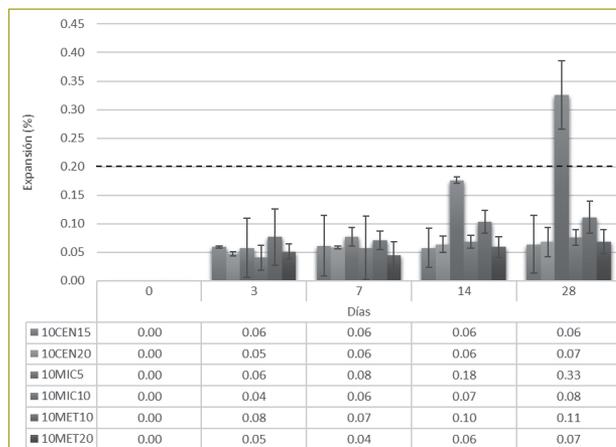


Figura 2 Comparación de 28 días con mitigantes en estudio para el agregado Cemex.

Para el agregado Tumaco, la ceniza volante tipo F con un remplazo parcial de cemento tipo III en un 20 % reduce la expansión en un 87 %; de la misma manera, el metacaolín con un remplazo del 20 % disminuye la expansión en un 91 %. Con un remplazo de 10 % microsilíce, se reduce la expansión en un 90 %. De lo anterior se infiere que para la combinación de agregado Tumaco con un cemento tipo III y una relación agua- cemento de 0,60 el mejor mitigante es el metacaolín (figura 3).

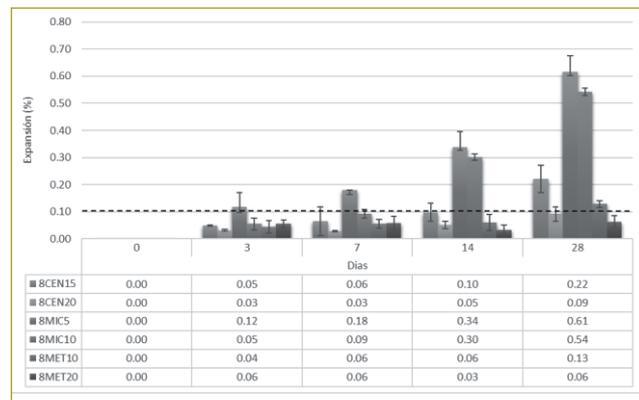


Figura 3 Comparación a 28 días con mitigantes en estudio para el agregado Tumaco.

Utilizando como criterio una expansión de 14 días de 0,10 % para medir la efectividad de las alternativas de mitigación mediante la ASTM C 1567, se hace un resumen de esta evaluación (tabla 7). Las alternativas que fueron eficaces con el agregado Tumaco fueron la ceniza volante tipo F con un remplazo de 10 % y el metacaolín con un remplazo del 10 %. Por otro lado, para el agregado Cemex fue eficaz de un 10 y 15 % de remplazo con ceniza volante tipo F, 10 % de microsilíce y 20 % de metacaolín.

Al comparar adiciones cementantes, el uso de ceniza volante tipo F, en concordancia según lo citado con Malvar et al. (2002), puede disminuir la expansión en remplazos del 20 al 25 % en peso, hasta valores de expansión menores del 0,10 %; es decir, puede reducir la reactividad de un agregado de potencialmente reactivo a inocuo.

El uso de microsilíce en remplazos del 5 al 10 % redujo la expansión para el agregado de Tumaco sin llegar a catalogarlo como inocuo; no obstante, para un

reemplazo del 10 % para el agregado Cemex se logró minimizar las expansiones a 28 días y clasificarlo como inocuo. Cabe decir que los resultados encontrados son coherentes con lo mencionado por Touma (2000) al afirmar que un reemplazo del 10 % de microsilice disminuye las expansiones en la misma cantidad que un 20 % de reemplazo con ceniza volante tipo F.

Tabla 7

Efectividad de alternativas de mitigación usando el criterio de 0,10 % de expansión a los 14 días.

Material cementante	Nivel de reemplazo en peso de cemento	Agregado 28 días expansión (Clasificación C1567)	
		TUCCON60	CECCON47
Ceniza volante clase F	15 %	Reactivo	Inocuo
	20 %	Inocuo	Inocuo
Microsilice	5 %	Reactivo	Reactivo
	10 %	Reactivo	Inocuo
Metacaolín	10 %	Inconcluso	Inconcluso
	20 %	Inocuo	Inocuo

El uso del metacaolín como mitigante de la reacción álcali-sílice, en un reemplazo del 20 % en peso para los agregados en estudio, disminuye las expansiones de tal manera que pueden clasificarse como inocuos. Garber et al. (2006) afirma que “El uso de metacaolín (...) aumenta la resistencia al ataque de RAS y sulfato, con un reemplazo del 10 %, aproximadamente”.

Análisis del comportamiento mecánico

A continuación se expondrá el efecto en las propiedades mecánicas de dos de las mezclas que presentaron reactividad en la etapa 1 (TUCCON60 y CECCON47), con la evaluación de las siguientes propiedades: resistencia a la compresión, a la flexión y módulo de elasticidad, comparándolas con dos de las muestras que dieron inocuas en la etapa 1 (BOCCON60 y BOCCON47).

Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cubos de mortero

Se realizó el ensayo de compresión sobre cubos de mortero para las combinaciones de mortero de la etapa 1 y

se ensayaron a 7, 14 y 28 días. La mitad de las muestras se colocaron en curado estándar a 28 días inmersas en agua y las otras en solución de NaOH.

Para el agregado Tumaco, la resistencia es similar al inicio para los dos tipos de curado evaluados (barras de color gris oscuro corresponden a las mezclas con un curado estándar, mientras que barras de color gris claro estuvieron inmersas en NaOH); posteriormente, a los 28 días ya se evidencia una pérdida de resistencia en un 20 % con respecto a las muestras con curado normal (figura 4).

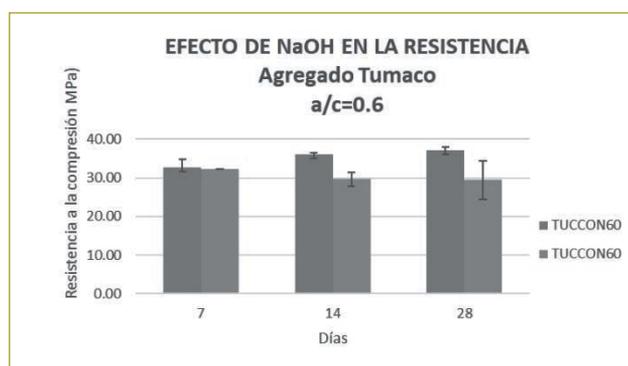


Figura 4 Comparación de resistencia a la compresión para agregado Tumaco con curado en agua y NaOH.

Para el agregado Cemex, se observa que las muestras con un curado estándar tienen un ascenso en la resistencia, mientras que las muestras sometidas a la solución de NaOH registran una merma de la resistencia a los 28 días y un 14 % de disminución.

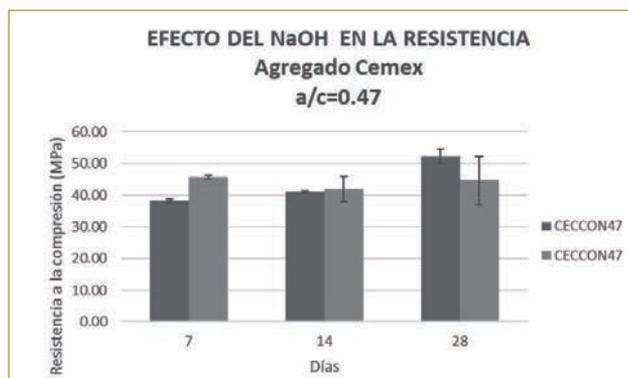


Figura 5 Comparación de resistencia a la compresión para agregado Cemex con curado en agua y NaOH.

Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cilindros de mortero

Al hacer el ensayo de compresión para cilindros de mortero de 45 mm de diámetro por 90 mm de alto, para las dos muestras reactivas de la etapa I, con una muestra que no tiene alta expansión y un cilindro con un remplazo de material mitigante (ceniza volante tipo F) en la proporción encontrada como más eficaz se halló que en agregados altamente reactivos se disminuye la resistencia a compresión en un 23 % en un lapso de 28 a 90 días, mientras que en las mezclas que contenían el agregado Cemex y en combinación con su mitigante no disminuyó la resistencia a compresión. Respecto a las probetas elaboradas con adición de ceniza volante, en las que contenían el agregado altamente reactivo (TUCCON60) la adición logró mantener la resistencia a compresión en las dos edades de ensayo y en las probetas que contenían el agregado Cemex la resistencia a compresión disminuyó en un 18 % en las dos edades (figura 6).

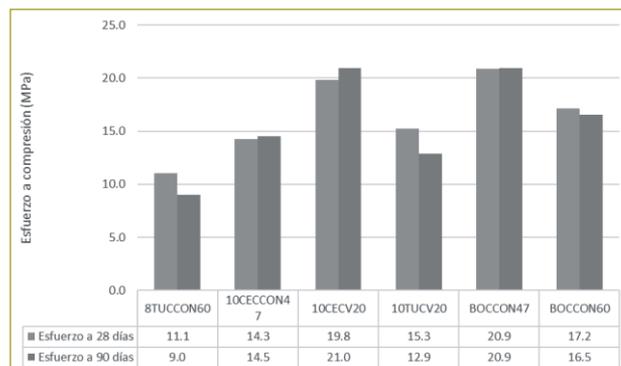


Figura 6 Gráfica de esfuerzo a compresión para cilindros de mortero.

Efecto del RAS en la resistencia a la flexión

Se realizó el ensayo a flexión sobre elementos prismáticos de 50 x 50 mm de sección transversal y 150 mm de longitud para las dos combinaciones usadas en la etapa II (TUCCON60 y CECCON47) y se compararon con dos muestras inocuas (BOCCON60 y CECCON47), utilizando el mismo tipo de cemento y la misma relación agua-cemento. El ensayo se hizo a 90 días, tiempo en el cual las vigas estuvieron sumergidas en NaOH a 80 °C.

A continuación se presenta el módulo de rotura, obtenido para las vigas que contenían el agregado Tumatico (TUCCON60); en éste se observa que disminuye

70 % respecto a las muestras que contenían el agregado inocuo (BOCCON60), en las mismas condiciones de exposición al NaOH. De la misma manera, para el agregado Cemex en su combinación reactiva (CECCON47), el módulo de rotura disminuye en 42 % respecto a las mezclas que contenían agregado inocuo (BOCCON47) (figura 7).

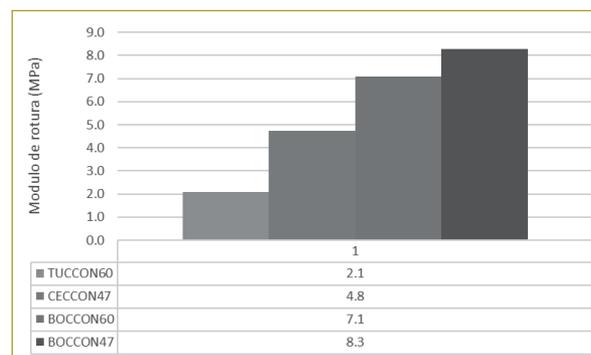


Figura 7 Módulo de rotura para vigas de mortero a 90 días.

Estos resultados evidencian una mayor sensibilidad de la resistencia a flexión de la RAS en mezclas que contienen agregados reactivos, en comparación con la resistencia a la compresión; comportamiento que puede atribuirse principalmente a la microfisuración. Comportamiento similar al reportado por Yurtdas et al. (2013), en el que se encontró que el mortero afectado por RAS no se muestra tan sensible, en el caso de la resistencia a compresión debido al cierre de las microfisuras bajo el esfuerzo de compresión, mientras que el esfuerzo a tracción rápidamente conduce a la propagación de microfisuras. Como se puede observar en las muestras ensayadas a flexión, la muestra ya presentaba un grado alto de fisuración debido al efecto RAS (figura 8).



Figura 8 Fisuración de viga de mortero debido a RAS.

Efecto del RAS en el módulo elástico

Se evaluó el módulo de elasticidad sobre cilindros de 45 mm de diámetro y 90 mm de altura para los dos agregados en estudio de la etapa 2 (TUCCON60 y CECCON47) y se compararon con dos muestras inocuas usando el mismo tipo de cemento y la misma relación agua-cemento. El ensayo se realizó a 28 y 90 días, durante los cuales estuvieron sumergidas en NaOH a 80 °C.

Se puede observar que para el agregado Tumaco en la muestra reactiva el módulo de elasticidad disminuyó en un periodo de 28 a 90 días en un 23 % por el efecto de la RAS, mientras que la muestra con un remplazo de ceniza volante en remplazo parcial de cemento en un 20 % en peso, presentó una disminución en el módulo de elasticidad en un 11 %. Por otro lado, en comparación con un agregado inocuo en la misma combinación de agua-cemento, se observó una reducción del módulo de elasticidad de 11 % (figura 9).

A su vez, para el agregado Cemex, se observa que la muestra reactiva no muestra una disminución en el módulo de elasticidad y en la combinación con un remplazo de ceniza volante de 20 % en peso; además, se presenta una disminución del 4 % en el valor del módulo de elasticidad.

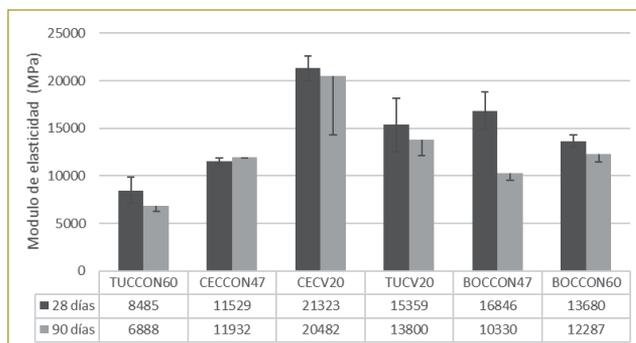


Figura 9 Módulo de elasticidad para probetas de la etapa 2 a 28 y 90 días.

Análisis petrográfico

Para complementar el programa experimental, se realizó un análisis petrográfico según la ASTM C 856 sobre láminas delgadas extraídas de los núcleos de las dos muestras reactivas de la etapa 1: TUCCON60 y CECCON47.

Con base en el análisis microscópico mediante sección delgada, se pudo detallar la composición interna

de los constituyentes y se encontraron agregados con características que los hacen potencialmente reactivos con los álcalis libres, como es el caso de las andesitas, basalto, tobas, cuarcitas, cherts, arcillolitas silíceas y cuarzos policristalinos. A continuación se especifica la proporción de estos agregados en cada una de las secciones estudiadas (tabla 8):

Tabla 8

Conteo de partículas. Informe NRB Micromatco SAS

Características de los constituyentes	Muestras	
	Tumaco	Cemex
Porcentaje de partículas		
Andesita basalto	34,4	10,5
Plagioclasa	31,1	14,0
Toba	23,3	8,8
Anfibol	7,8	0,0
Fragmento alterado	2,2	0,0
Proxeno	1,1	0,0
Granito	0,0	21,9
Cuarcita	0,0	7,9
Feldespato potásico	0,0	4,4
Arcillolita silícea	0,0	0,9
Cuarzo	0,0	7,9
Esquisto	0,0	1,8
Chert	0,0	14,0
Cuarzo policristalino	0,0	3,5
Arcillolita	0,0	0,9
Arenisca fina	0,0	0,9
Limolita arcillosa	0,0	0,9
Total	100,0	100,0

Se observa que la composición en porcentaje de los agregados Tumaco y Cemex en los agregados reactivos están en el 58 y 46 %, respectivamente, con un porcentaje mayor de andesitas, plagioclasas y tobas en el agregado Tumaco, mientras que el de Cemex presenta una gran variedad de agregados reactivos, como el chert, cuarzo, cuarcita, andesita, basalto y plagioclasa.

Según los resultados de la petrografía se observó la presencia de microgrietas en las muestras (2,4 y 1,0 %, respectivamente), con aberturas de 0,006 a 0,08 mm, formando un patrón hexagonal, las cuales se encuentran atravesando la pasta de cemento y algunos agregados. Cabe destacar para ambos agregados la presencia del gel de reacción álcali-sílice.

Se observa la presencia de un gel incoloro, cristalino y birrefringente, con colores de interferencia de primer

orden (gris a blanco) a segundo orden, localizado adentro de algunos vacíos y grietas en la pasta cementante. La existencia de este gel es más notoria en la muestra Tumaco.

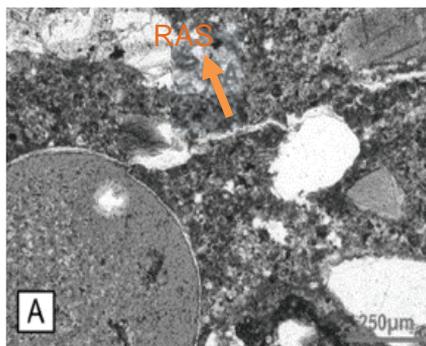
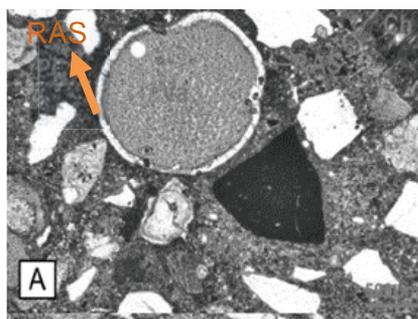


Figura 10
Microfotografías bajo el microscopio petrográfico de la muestra Tumaco evidenciando la RAS.

Figura 11
Microfotografías bajo el microscopio petrográfico de la muestra Cemex evidenciando la RAS.



CONCLUSIONES

Al evaluar la reactividad potencial de los tres agregados se encontró que al aumentar la relación a/c de la estándar (0,47) a 0,60 en su mayoría, para las combinaciones de los agregados en estudio, aumentaron la porosidad del concreto endurecido y la fluidez de la mezcla, dejando más espacio para la formación del gel. Por esto se puede concluir que la expansión se relaciona directamente con el aumento de la relación (a/c), para las combinaciones agregado-cemento en estudio.

El material cementante más eficaz para prevenir la RAS debe estudiarse en particular para cada agregado. Como se observó, la ceniza volante, el microsílíce y el metacolín son competentes para mitigar la RAS, esto es, reducir la expansión hasta limitarlas al grado de inocuas, en diferentes proporciones de remplazo.

El uso de materiales cementantes en remplazo en proporciones adecuadas, como la ceniza volante tipo F, traen ventajas en minimizar el fenómeno de RAS, aumenta la resistencia a la compresión en un 27 % y ayuda a evitar la pérdida del módulo de elasticidad en un 50 %, para los agregados en estudio.

Al efectuar el estudio petrográfico se pudo apreciar que los agregados encontrados como reactivos (Tumaco y Cemex) contenían álcalis libres, como es el caso de las andesitas, basalto, tobas, cuacitas, cherts, arcillolitas silíceas y cuarzos policristalinos. Se puede inferir que los componentes tetraédricos del agregado Tunjuelo, aunque contenía más porcentaje de sílice, no eran inestables o sus partículas de sílice estaban incompletas, en concordancia con los resultados hallados con el ensayo ASTM C 1260 de los agregados estudiados.

Al analizar el comportamiento mecánico del mortero para las condiciones de ataque establecidas en esta investigación, se encontró que la resistencia a la compresión se ve afectada por la RAS, en una disminución de ésta de 15 a 20 % respecto a las muestras sin RAS. La disminución de resistencia a la compresión se ve más pronunciada con el paso del tiempo, es decir, que el debilitamiento de los elementos construidos con agregados reactivos va perdiendo resistencia de manera progresiva.

La RAS ocasiona una disminución del módulo de elasticidad debido a la microfisuración, y de manera significativa en agregados altamente reactivos, presentan una pérdida de rigidez y tenacidad en las secciones diseñadas inicialmente.

Nota: Los resultados son aplicables sólo para las variables de estudio de este artículo y serán aplicables según el criterio del profesional que los aplique.

REFERENCIAS

- ASTM C 294 (2005). Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates. The American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards: 10 pp.
- ASTM C1567-13 (s.f.). Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org.
- ASTM C305-14 (2014). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM C1260-14 (2014). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM C109 / C109M-16a (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM C109 / C109M-16a (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using

2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
ASTM C39 (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials*, 1–7. <http://doi.org/10.1520/C0039>.
ASTM (2014). ASTM C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International*, 1–5. <http://doi.org/10.1520/C0469>.
Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Fournier, B., & Thomas, M. D. (2006). Technical Report Documentation Page Form DOT F 1700. 7 (8-72). Reproduction of completed page authorized, 7.

Malvar, L. J., Cline, G. D., Burke, D. F., Rollings, R., Sherman, T. W., & Greene, J. L. (2002). Alkali Silica Reaction Mitigation: State of the Art and Recommendations, (99).
Osuna Vargas, M.A. (2009). Previniendo el "cáncer" del concreto. *Construdata* ISSN 2322-6552.
Touma, W. E. (2000). Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation, 1–556.
Yurtdas, I., Chen, D., Hu, D. W., & Shao, J. F. (2013). Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 47, 165–174. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.046>.