



Efectividad de las puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado

P. L. VALDEZ TAMEZ*, G. FAJARDO SAN MIGUEL*, R. HERMOSILLO MENDOZA**, I. FLORES VIVIAN**

La expansión excesiva del concreto provocada por la reacción entre los iones hidróxilos liberados de compuestos alcalinos, contenidos en la solución del poro del concreto y ciertas fases minerales (principalmente en forma de sílice) de los agregados, causa esfuerzos internos que se traducen en agrietamientos y desprendimientos del recubrimiento de las estructuras de concreto. El producto expansivo se presenta en forma de un hidrato gelatinoso que contiene principalmente sílice, sodio, potasio, calcio y agua; y su volumen es mayor que el de la sílice consumida.¹

Este tipo de deterioro es estimulado cuando en la estructura se presentan concentraciones mínimas de álcalis (Na y K) y ciclos de humedecimiento y secado,² esto causa que el fluido del poro sea absorbido por el gel, incrementando su volumen, y como consecuencia induce a esfuerzos perjudiciales en la interface pasta-agregado.

En México, se ha tratado de disminuir el desarrollo de la reacción álcali-agregado, sobre todo en estructuras de concreto hidráulicas de importancia que tengan contacto con el agua, tales como: obras hidráulicas para riego, control de ríos y generación de energía eléctrica, obras marítimas y centrales termo y nucleoelectricas. Ya que los agregados son parte fundamental en el desarrollo de

estas reacciones, se ha realizado una zonificación en nuestro país, en la cual se han identificado las zonas que poseen agregados considerados como potencialmente reactivos;³ asimismo, se han establecido, en las normas correspondientes, los valores límite de expansión producida por este tipo de deterioro para la aceptación de los mismos. La norma NMX C 111-ONNCCE-2004 especifica los requerimientos que deben cumplir los agregados para usarse en el concreto y define los criterios para el posible uso de los agregados que presentan esta problemática.⁴

Una alternativa viable para reducir las consecuencias de las reacciones álcali-agregado es el uso de puzolanas en el concreto. Las puzolanas contienen sílice reactiva, la cual, finamente dividida, reacciona rápidamente con los álcalis de la solución del poro,⁵ disminuyendo el poder destructivo del gel en la matriz cementante. Sin embargo, la efectividad es función de la cantidad de fase amorfa y de las características microestructurales de la puzolana.

Según la American Society for Testing and Materials (ASTM), las puzolanas naturales son materiales silicios o silíceo-aluminosos, los cuales por sí

* Departamento de Tecnología del Concreto, FIC-UANL.

** Estudiante del Programa Doctoral de Ingeniería de Materiales de Construcción y Estructuras, FIC-UANL

solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.⁶

Investigaciones realizadas a materiales puzolánicos como la ceniza volante, humo de sílice, escoria granulada de alto horno, metacaolín, y la ceniza de cascarilla de arroz, demuestran que el uso de este tipo de materiales es efectivo para controlar las expansiones en sistemas reactivos.⁷⁻¹⁰ Sin embargo, son pocas las investigaciones realizadas en este sentido sobre puzolanas naturales.

Aunque a la fecha existen diferentes métodos (estandarizados y no estandarizados) para evaluar la potencialidad reactiva de los agregados y la efectividad de los materiales puzolánicos, la aceptación de algunos de éstos sigue causando controversia.^{11,12}

Con el objetivo de estudiar la efectividad de tres diferentes puzolanas naturales mexicanas para reducir la expansión provocada por la reacción álcali-agregado, se realizaron especímenes conforme al método acelerado descrito en ASTM C 1260-05,¹³ con la variante de utilizar agregados reactivos a base de vidrio pírex. En este método, las barras de mortero se someten a condiciones severas de exposición, es decir, sumergidas en una solución con hidróxido de sodio y a 80°C.

Materiales y métodos

Como material cementante primario se utilizó un cemento portland ordinario (CPO 40R), el cual presenta un alto contenido de álcalis. El cemento cumple con los requerimientos establecidos en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004.¹⁴

Como agente reactivo y haciendo la función de agregado fino en los morteros se utilizó vidrio pírex. Dicho material se trituró y separó en varios tamaños conforme a los requerimientos de graduación establecidos en la norma ASTM C 441-05.¹⁵ En la tabla I se muestra la distribución granulométrica.

Los materiales puzolánicos a evaluar provienen de una búsqueda geológica nacional y serán denominados PA, PB y PC. Después de realizar un muestreo representativo, las puzolanas se secaron a 110°C por 24 horas. Posteriormente fueron trituradas, pulverizadas y molidas hasta lograr que de 91 a 93 % del material pasara la malla 325 (45 m).

La fineza se determinó a través del método descrito en la norma ASTM C 430-96.¹⁶ El análisis químico cualitativo y cuantitativo de los materiales se realizó con pastillas de vidrio y equipo Bruker AXS de fluorescencia de rayos X. La pérdida por ignición y el contenido de residuo insoluble se determinó con el método descrito en la norma ASTM C 114-00.¹⁷

Las diferentes fases minerales de los materiales se determinaron con la técnica de difracción de rayos X (DRX) en polvos y equipo Broker. El generador se fijó en 35 kV y 25 mA, y la longitud de onda de la radiación estándar $\text{CuK}\alpha$ (λ) fue 1.5418 Å.

Se realizó el análisis petrográfico de los materiales puzolánicos, utilizando secciones delgadas. Con la ayuda de esta técnica y la DRX se determinó el porcentaje de la matriz vítrea.

Se determinó la distribución del tamaño de las partículas a través de la técnica de difracción láser, con un equipo Malvern modelo Mastersizer 2000.

Las áreas superficiales específicas de las puzolanas se obtuvieron por adsorción de nitrógeno marca Quantachrome, modelo Nova 200e. La prueba se llevó a cabo efectuando vacío por un período de 20 horas a 100°C, y se aplicó el méto-

Tabla I. Distribución de partículas vidrio pírex

Malla que pasa	Malla retenida	% en masa
No. 4	No. 8	10
No. 8	No. 16	25
No. 16	No. 30	25
No. 30	No. 50	25
No. 50	No. 100	15

do del análisis BET sobre las isothermas de adsorción y desadsorción.

Con los materiales anteriormente descritos se fabricaron morteros, se empleó la siguiente nomenclatura: MR, MPA, MPB y MPC, siendo el MR el mortero de referencia, fabricado utilizando sólo CPO como material cementante. Para el resto de los morteros (MPA, MPB y MPC) se sustituyó 20% de la masa de CPO por las respectivas puzolanas naturales.

La preparación de los moldes, el mezclado del mortero y el moldeo de los especímenes se realizó a partir del método establecido en ASTM C 227-03.¹⁸ Para cada uno de los morteros en estudio se produjeron especímenes con dimensiones de 25x25x285 mm, con una longitud efectiva de 254 mm.

Los morteros se produjeron con una relación agua/cementante de 0.47 y en proporción de 1:2.25 de partes de cementante a partes de agregado pícex.

Las barras se retiraron de los moldes 24 horas después de haber sido fabricadas. Luego de la identificación, se determinó su longitud con un comparador digital, tal como se especifica en ASTM C 490-04.¹⁹ Posteriormente, se colocaron, inmersas en agua, en recipientes cerrados y a $80 \pm 2.0^\circ\text{C}$, por un período de 24 horas, después de éste se midieron nuevamente considerando esta lectura como "cero". Al terminar este periodo, se retiraron del agua y se colocaron, sumergidas en una solución 1N de NaOH, a $80 \pm 2.0^\circ\text{C}$, y se colocaron de la misma manera en recipientes cerrados. Bajo esta condición de exposición, se realizaron medidas subsiguientes hasta completar 21 días de exposición.

Resultados y discusiones

En la tabla II se presenta el análisis químico de los materiales utilizados. Se puede observar que el CPO presenta alto contenido de álcalis ($> 0.6\%$ como $\text{Na}_2\text{O eq.}$), lo cual tiene influencia directa en la reacción expansiva del sistema. Las puzola-

nas muestran un carácter ácido ($\text{SiO}_2 > 65\%$) y cumplen con lo que establece la norma ASTM C 618-05²⁰ al superar 70% como mínimo de la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .

Tabla II. Análisis químico de los materiales.

Elemento	CPO	Vidrio pírex	PA	PB	PC
SiO_2	18.88	84.66	64.91	70.23	72.57
Al_2O_3	4.35	2.08	11.80	12.31	12.00
Fe_2O_3	1.86	0.06	2.94	2.17	1.93
CaO	64.46	0.43	4.21	2.16	2.78
B_2O_3	---	7.15	---	---	---
MgO	1.24	---	1.43	0.55	0.43
SO_3	3.35	---	0.07	0.00	0.00
Na_2O	0.31	4.89	1.61	2.36	2.85
K_2O	0.60	0.60	1.95	5.14	4.36
TiO_2	0.24	---	0.33	0.23	0.20
P_2O_5	0.12	---	0.04	0.02	0.01
Mn_2O_3	0.05	---	0.12	0.05	0.04
PxI 950°C	3.30	---	10.30	3.54	1.50
Suma	98.76	99.87	99.71	98.76	98.67
$\text{Na}_2\text{O eq.}$	0.71	5.28	2.90	5.75	5.72
Residuo insoluble	---	---	69.80	86.92	86.46
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	25.09	86.80	79.64	84.71	86.50

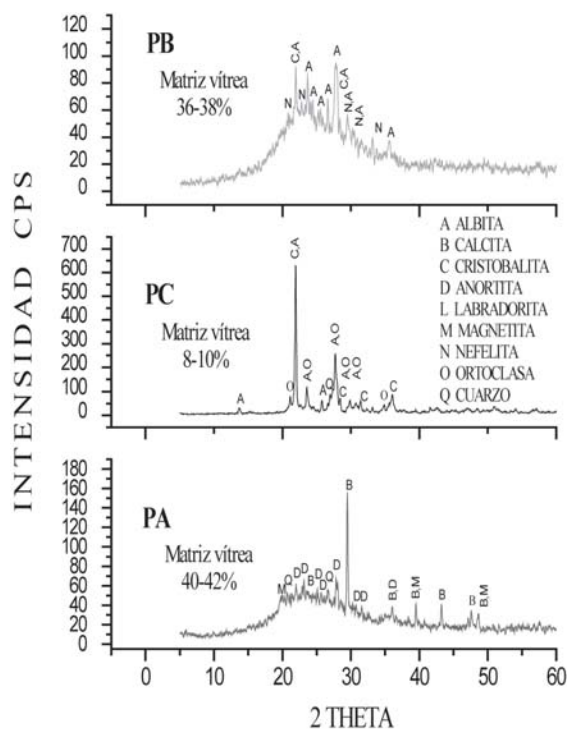


Fig. 1. Espectros del análisis de DRX de puzolanas.

La figura 1 muestra los espectros de DRX de las tres puzolanas, las fases mineralógicas y el porcentaje de la matriz vítrea. Se puede observar que la puzolana con mayor fase cristalina es la PC; sin embargo, presenta aproximadamente 37% de cristobalita, la cual es una fase metaestable que presenta actividad puzolánica.²¹

En la tabla III se presentan las áreas superficiales específicas determinadas por BET, se observa que la puzolana PA cuenta con la mayor área superficial y la menor cantidad de fases cristalinas, lo cual se manifiesta en un mejor comportamiento puzolánico.

Tabla III. Áreas superficiales analizadas por BET (adsorción de nitrógeno).

Material	m ² /g
PA	39.58
PC	8.83
PB	4.61

En la tabla IV se muestra la descripción petrográfica de las puzolanas. Todas las puzolanas son clasificadas como ignimbritas por tener origen ígneo, provienen de origen piroclástico, contienen principalmente feldespatos alcalinos, cuarzo, cristobalita y, en menor cantidad, feldespatos potásicos; lo anterior, en una matriz vítrea.

Tabla IV. Descripción petrográfica.

Material	Descripción
PA Dacita	Traquidacita Roca volcánica piroclástica, textura porfírica contiene feldespatos alcalinos, plagioclasas y escasamente se reconocen cristales tabulares de clinopiroxenos. Asimismo, se observan fenocristales de cuarzo, lo anterior en una matriz vítrea.
PB Riolita	Toba vítrea Textura piroclástica de grano fino con fragmentos de feldespatos
PC Riolita	Pumicita Textura vítrea con matriz de vidrio con composición ácida.

La figura 2 muestra la distribución del tamaño de las partículas y el diámetro promedio de las puzolanas. El rango de tamaños oscila entre los 10.4 y 14.0 μm y las distribuciones son similares, por lo cual esta característica de las puzolanas no es una variable que influya en el análisis comparativo de los resultados.

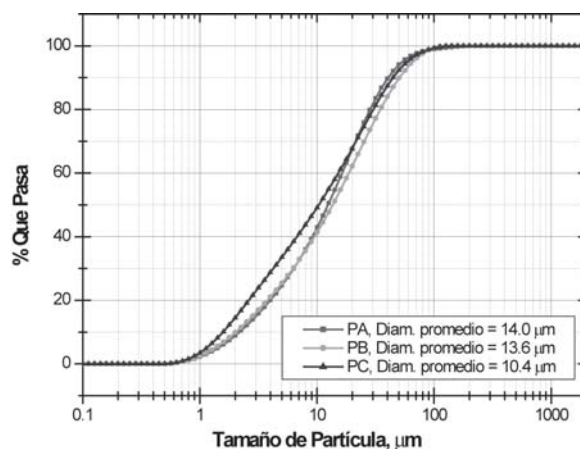


Fig. 2. Distribución de tamaño y promedio de partículas obtenidas por difracción láser.

En la figura 3 se muestran las curvas que representan el porcentaje de expansión, efecto de la reacción entre los álcalis en la solución del poro y los agregados reactivos (vidrio pírex). La expansión fue medida directamente de las barras de morteros con y sin puzolana.

Analizando los resultados a los 21 días de exposición, el mortero de referencia, MR presenta

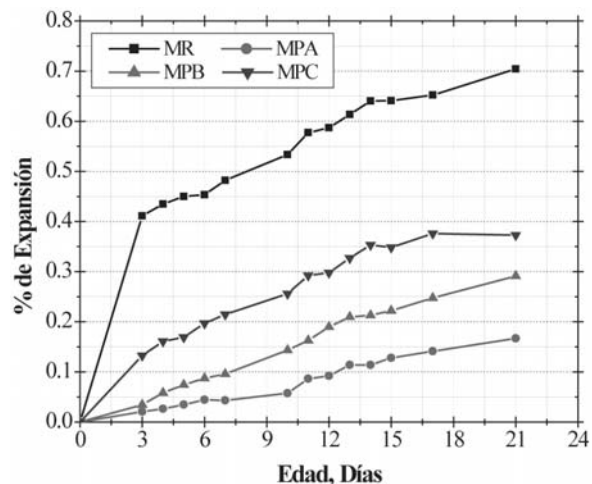


Fig. 3. Curvas de expansión de barras de morteros en solución de NaOH a 1N y 80°C.

expansiones promedio de 0.70%; para el caso de los morteros con las puzolanas naturales MPA, MPB y MPC, las expansiones se reducen a valores de 0.17, 0.29 y 0.37%, respectivamente, siendo la puzolana PA la que disminuye más la reacción expansiva.

Al correlacionar las propiedades físico-químicas de la puzolana PA con los valores de expansión obtenidos, encontramos una relación directa de su efectividad para disminuir la reacción deletérea, ya que, comparativamente, la puzolana PA tiene la menor cantidad de álcalis que el resto de las puzolanas (2.90% como NaO eq.), tiene mayor contenido de fase reactiva (40-42%) y cuenta con la mayor área superficial (39.58 m²/g).

La puzolana PB contiene más de álcalis que la puzolana PA (5.75%), parte de éstos son liberados en forma de iones al entrar en disolución acuosa; otra parte es atrapada en los productos de la reacción puzolánica o fijados en los silicatos de calcio hidratados con menor relación CaO:SiO₂. Asimismo, tiene un contenido de matriz vítrea ligeramente menor que la puzolana PA (36-38%) y tiene la menor área superficial de las tres puzolanas, esta combinación de propiedades hace que la puzolana PB sea menos eficiente que la puzolana PA.

La puzolana PC a pesar de tener la menor cantidad de fase reactiva (8-10%) y el mismo contenido de álcalis que la puzolana PB, cuenta con la fase cristobalita que apoya fuertemente su potencialidad puzolánica, tiene una área superficial de 8.83 m²/g y presenta el menor tamaño promedio de partículas (10.4 µm), esta combinación de propiedades reduce de forma significativa la expansión en relación al mortero de referencia MR.

En la tabla V se presentan los porcentajes de reducción de la expansión a diferentes edades y en relación al mortero de referencia MR. A los 21 días, el MPA disminuye 76% la expansión; el MPB, 59%, y el MPC, 47%, lo anterior en relación al mortero de referencia. Queda demostrada la efectividad de las puzolanas naturales para reducir el efecto expansivo de la reacción álcali-agregado.

Tabla V. Reducción de la expansión a diferentes edades expresada en % y en relación al mortero de referencia.

Edad	Morteros con puzolana natural		
	MPA	MPB	MPC
3	95	92	68
4	94	87	63
5	92	83	62
6	90	81	57
7	91	80	55
10	89	73	52
11	85	72	49
12	84	68	49
13	81	66	47
14	82	67	45
15	80	65	46
17	78	62	42
21	76	59	47

Con la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), se pueden observar en la figura 4, los agrietamientos masivos en la interface de las partículas de vidrio pírex, producto de la reacción expansiva en el mortero MPC. En las figuras 5 y 6 se presentan los productos expansivos, formados principalmente a base de gel de sílice en la solución del poro. En la figura 5 se aprecia cómo el gel ha ido emigrando a través de la red permeable para llenar un poro del mortero, y en la figura 6 se aprecia la morfología típica del gel.

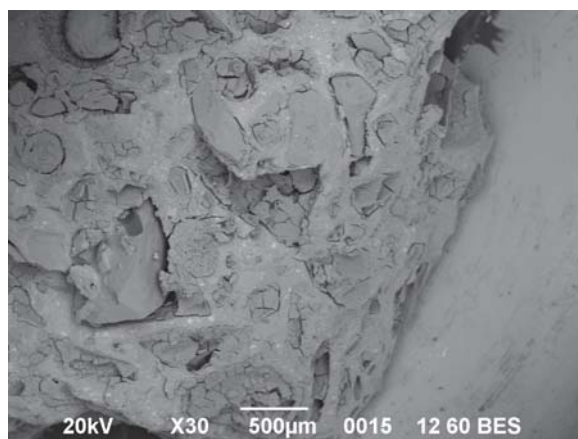


Fig. 4. Imagen del mortero MPC obtenida por SEM.

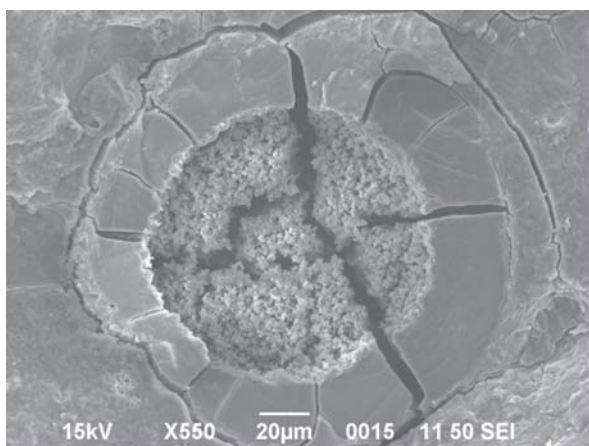


Fig. 5. Imagen del mortero MPC en la cual se observa el gel en el interior de un poro.

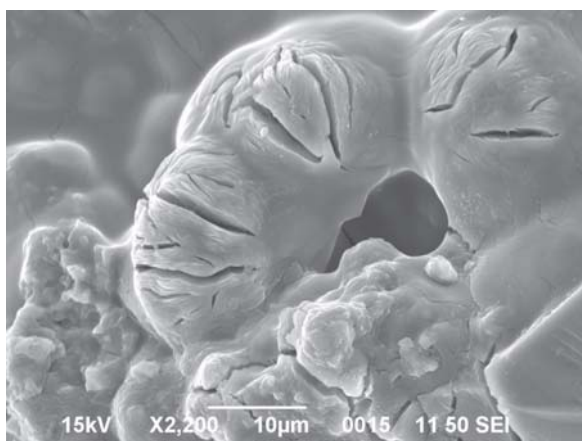


Fig. 6. Morfología típica del gel de sílice.

Conclusiones

Las puzolanas naturales usadas en el presente estudio muestran un comportamiento satisfactorio para reducir la expansión álcali-agregado en barras de mortero sometidas a condiciones extremas de exposición.

Se observa una relación directa entre las propiedades físicas, químicas y morfológicas de las puzolanas y su eficiencia para reducir la expansión.

El método acelerado utilizado y las variaciones propuestas pueden usarse para realizar evaluaciones comparativas y definir la efectividad de diversos materiales puzolánicos para reducir la expansión destructiva.

Resumen

En esta investigación se caracterizaron tres diferentes materiales puzolánicos naturales de origen ígneo. Se investigó la relación existente entre las características físico-químicas particulares de cada material y su capacidad para disminuir la expansión deletérea producida por la reacción álcali-agregado. Para determinar la efectividad en la reducción de la expansión, se fabricaron barras de morteros que contenían agregado reactivo y, como material cementante, cemento portland ordinario y puzolana natural. Las barras se sometieron a condiciones extremas de exposición y se midieron sus cambios longitudinales producto de la reacción expansiva. Los resultados indican que las puzolanas naturales reducen en más de 40% la expansión de la reacción álcali-agregado en relación a morteros que sólo contiene cemento portland ordinario como material cementante.

Palabras clave: Puzolanas naturales, Reacción álcali-agregado, Morteros.

Abstract

The potential of three different igneous natural pozzolan materials for diminishing deleterious expansion produced by alkali-aggregate reaction was investigated in relation to their physical and chemical characteristics. Bars of mortars containing reactive aggregate and ordinary Portland cement and natural pozzolan (as cementitious) were tested for expansion reduction. The bars were subjected to extreme exposure conditions. Longitudinal changes due to the expansive reaction were measured. The results indicate that natural pozzolans reduce in more than 40% the expansion produced by the alkali-aggregate reaction with respect to mortars containing only ordinary Portland cement.

Keywords: Natural pozzolans, Alkali-aggregate reaction, Mortars.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica de la UNAL (Paicyt CA 1054-05), así como a los estudiantes y colaboradores del Departamento de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL.

Referencias

1. J. Bensted, P. Barnes. *Structure & Performance of Cements*. Thomas Telford. 2001, p. 265.
2. ACI 221.R-98, State of the Art Report on Alkali-Aggregate Reactivity, pp.3.
3. O. Hernández-Castañeda y C.J. Mendoza-Escobedo. Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, UNAM, Vol. VII. 1, 2006, pp. 57-70.
4. Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004, Industria de la Construcción-Agregados para Concreto Hidráulico-Especificaciones y Método de Prueba.
5. J. Francis Young, et al., *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*, Prentice Hall, 1998, pp. 243-244.
6. ASTM C 618-89. Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. Section 4, Volume 4.01, 1989, pp. 296-298.
7. Roy H. Keck, Improving concrete durability with cementitious materials, *Concrete International*, September 2001, Vol. 23, No. 9, pp. 47-51.
8. L. Javier Malvar, Lary R. Lente, Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction based on chemical composition, *ACI Materials Journal*, Vol.103, No 5, September/October 2006, pp. 319-326.
9. R. Bleszynski, M. Thomas, D. Hooton, The efficacy of ternary cementitious systems for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, 11 th conference on alkali-aggregate reaction, Quebec, 2000, pp.583-602.
10. R.G. Sibbick, P.J. Nixon, Investigation into the effects of metakaolin as a cement replacement materials in ASR reactive concrete, 11th conference on alkali-aggregate reaction, Quebec, 2000, pp.763-772.
11. Bérubé M-A., Duchesne J., Chouinard D. Why the Accelerated Mortar Bar Method ASTM C 1260 is Reliable for Evaluating the Effectiveness of Supplementary Cementing Materials in Suppressing Expansion Due to Alkali-Silica Reactivity. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 17, No.1, June 1995, pp. 26-34.
12. Evaluation of accelerated test methods for determining alkali-silica reactivity of concrete aggregates. Duyou Lu, B. Fournier, P.E. Grattan-Bellew, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, 2006, pp. 546-554.
13. ASTM C 1260-05. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). Section 4, Volume 4.02, 2006, pp. 676-680.
14. NMX-C-414-ONNCCE-1999, Norma Mexicana, Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba.
15. ASTM C 441-05. Standard Test Method for Effectiveness of Pozzolans or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction. Section 4, Volume 4.02, 2006, pp. 245-247.
16. ASTM C 430-96, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve, Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 242-244.
17. ASTM C 114-05, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, Section 4, Volume 4.01, 2005, pp. 103-133.
18. ASTM C 227-03, Standard Test Methods for Potential Alkali Reactivity of Cement-

- Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method), Section 4, Volume 4.02, 2006, pp. 147-151.
19. ASTM C 490-04, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, Section 4, Volume 4.02, 2006, pp. 272-176.
 20. ASTM C 618-05, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Section 4, Volume 4.02, 2006, pp. 326-328.
 21. <http://mineral.galleries.com/minerals/silicate>

Recibido: 22 de noviembre de 2007

Aceptado: 16 de enero de 2008