



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

ANÁLISIS DE MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

C.F.C. Silva, E.C.B. Monteiro, A.D. Gusmão

Escuela Politécnica de la Universidad de Pernambuco - UPE, Brasil, Recife – PE.
Universidad Católica de la Universidad de Pernambuco – UNICAP

RESUMEN

Existen innumerables obras de hormigón afectadas por la reacción álcali-agregado (RAA) en varios países. La prevención es aún la única forma eficiente de evitar que se desarrolle la RAA, mas no obstante, los daños causados son irreversibles. Una manera muy eficaz consiste en utilizar métodos de ensayos que presten auxilio en la investigación de esa reacción deletérea. El presente estudio tiene por objetivo la realización de análisis comparativo entre el resultado del método petrográfico y los límites de expansión de tres normas del método acelerado de las barras de argamasa, realizados con agregados del estado de Pernambuco/Brasil, buscando identificar las características reactivas que ejercieron influencia sobre el resultado de las expansiones. El método acelerado no se mostró seguro por presentar resultados de reactividad distintos, dependiendo de los límites de expansión de cada norma utilizada. Sin embargo, de acuerdo con los resultados, se aconseja el desarrollo de nuevos estudios, así como proponer nuevos métodos de ensayos que presenten mayor confiabilidad al utilizarse los agregados en estructuras de hormigón.

Palabras clave: Hormigón. Métodos de ensayo. Reacción álcali-agregado

INTRODUCCIÓN

Aunque el hormigón pueda ser considerado como un material de construcción muy utilizado en escala mundial, está sujeto a manifestaciones patológicas provenientes de los materiales que lo constituyen y del ambiente en el cual se encuentra insertado. Esas patologías comprometen la durabilidad de las estructuras de hormigón, interfiriendo en su vida útil.

Son varios los procesos de deterioro que interfieren en la durabilidad del hormigón, pudiendo ser clasificados como procesos químicos y físicos. Entre los procesos químicos más frecuentes se encuentran la corrosión de armaduras, carbonatación, penetración por iones cloruro, ataque por sulfatos y reacción álcali-agregado (VALDUGA, 2002).

La reacción álcali-agregado (RAA) es una reacción lenta que ocurre internamente en la masa de hormigón, formada por la reacción entre algunos minerales de los agregados e hidróxidos alcalinos normalmente oriundos del cemento, pudiendo comprometer el funcionamiento de las estructuras impactadas.

La RAA se descubrió en la década del 30 en California, cuando se observaron fisuras y expansiones en estructuras de hormigón, causando preocupación en el medio técnico. En el período comprendido entre 1950 y 1960 el estudio de esta patología fue dejándose de lado, volviendo las investigaciones sobre el asunto de manera más rigurosa en la década del 70, cuando comenzaron a surgir relatos de anomalías de dicha patología en diversos países. Frente a ello, fueron apareciendo varios estudios y ensayos sobre el tema, con el objetivo de entender mejor la reacción álcali-agregado.

Existen en la actualidad innumerables obras de hormigón afectadas por la RAA en más de 35 países, y los casos principales donde ocurre este tipo de problema lo constituyen las obras de pavimentación de carreteras y aeropuertos, diques, puertos, puntos y fundaciones diversas (FIGUEIRÔA & ANDRADE, 2007).

Se descubrieron diversos casos de esta patología deletérea en elementos de fundación en la Región Metropolitana de Recife (RMR) localizado en el Nordeste de Brasil. Figueirôa & Andrade (2007), publicaron un estudio abordando varios casos de RAA encontrados en bloques de fundación en el referido lugar.

Los agregados grandes utilizados en obras de la Región Metropolitana de Recife provienen, casi en su totalidad, de yacimientos rocosos explotados por empresas relativamente próximas, tornando viable el costo referente al transporte del material. Algunas de esas empresas extractoras están localizadas en las proximidades de estructuras que sufrieron la acción de esfuerzos tectónicos, siendo este proceso responsable por la reactividad de los agregados (ANDRADE et al., 2006).

Frente a lo expuesto, la prevención es aún la única forma eficiente de evitar que la RAA se desarrolle; no obstante, los daños causados son irreversibles y las soluciones de recuperación existentes aún son paliativas, aunque existan varios años de investigación en todo el mundo.

Una manera bastante eficaz de evaluar la posibilidad de desencadenarse la RAA es adoptar medidas que atenúen las condiciones favorables a su aparición, por medio de la utilización de métodos de ensayos que auxilien en dicha investigación. Uno de los métodos muy utilizados es el acelerado de las barras de argamasa, que analiza la potencialidad deletérea del agregado en un espacio de tiempo muy reducido.

Este ensayo viene demostrando cierta falta de confiabilidad, pues han sido encontrados resultados falso-negativos (agregados clasificados como inocuos por el ensayo y que presentaron efecto deletéreo en campo) y falso-positivos (agregados clasificados como reactivos por el ensayo y que desempeñaron buen comportamiento en campo) (SANCHEZ, 2008).

En muchos países, los investigadores extienden las mediciones de los ensayos hasta los 28 días a partir de la lectura inicial, manteniendo los límites propuestos en norma, a fines de detectar los agregados con reactividad lenta.

No existe aún un consenso en lo que se refiere a límites de expansión y al período de tiempo de análisis de los agregados en el ensayo acelerado de las barras de argamasa, pues existen varias normas para el ensayo en cuestión, cuyos límites de expansión y tiempo fueron adaptados de acuerdo con los agregados existentes en los diversos países, conforme muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Adaptaciones del método acelerado de las barras en cuanto a los límites de expansión y tiempo adoptados en diferentes países (BELLEW, 1997).

País	Edad (días)	Límite de expansión (%)
África del Sur	12	0,11
Italia	12	0,10
Australia	10-22	0,10
Canadá – CSA A23.2-25A	14	0,15
Estados Unidos – ASTM C 1260	14	0,10
Noruega	14	0,15
Argentina	28	---

La metodología y los límites de la nueva norma brasileña del método acelerado de las barras NBR 15577-4 publicada en 2008, fue el resultado de un amplio estudio en el que se consideraron datos de ensayos y resultados de investigaciones de diversos laboratorios y en trabajos académicos, totalizando aproximadamente 300 muestras de agregados con litologías diferentes. A partir de estos análisis se establecieron en la norma brasileña de expansión (NBR 15577-4, 2008) los límites de clasificación de agregados reactivos e inocuos (HASPARYK, 2008).

Frente a lo expuesto, se hace necesario un análisis comparativo entre el resultado del método petrográfico y los límites de expansión de tres normas del método acelerado de las barras de argamasa, realizados con agregados silíceos del estado de Pernambuco, situado en la región Nordeste de Brasil, buscando identificar las características reactivas que ejercieron influencia en el resultado de las expansiones.

EXPERIMENTO

Para la realización de los ensayos, fue necesaria la colecta de muestras de rochas de seis canteros situados en cinco ciudades del estado de Pernambuco y un tipo de cemento estándar.

2.1 *Ensayos realizados*

Los métodos de ensayos realizados fueron el análisis petrográfico a través de la NBR 15577-3 (2008), realizado en la Asociación Brasileña de Cemento Portland (ABCP), y el ensayo acelerado de las barras de argamasa, según procedimiento propuesto por las normas ASTM C 1260 (2005), NBR 15577- 4 (2008) e CSA A23.2-25A (1994).

2.2 *Materiales utilizados*

2.2.1 *Agregados*

Los agregados recolectados para ensayo son oriundos de canteros que suministran o suministraron agregados grandes para su utilización en hormigón en la Región Metropolitana de Recife. Las muestras de rocas fueron recolectadas en los propios canteros, donde los macizos rocosos ya habían sido demolidos y las piedras se encontraban amontonadas para su posterior molienda.

Las muestras fueron molidas para alcanzar las fracciones granulométricas establecidas en la norma, se pasaron por tamiz, fueron lavadas en agua corriente, secadas en ambiente controlado y almacenadas en bolsas plásticas cerradas. La Tabla 2 muestra las fracciones granulométricas y las cantidades utilizadas para confección de cada tres barras en el ensayo acelerado.

Tabla 2. Granulometría del agregado para ensayo acelerado de las barras.

Tamiz con abertura de tejido (NBR NM ISSO 3310-1)		Cantidad de material en masa	
Pasante	Retenido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

2.2.2 Cemento

Se utilizó un cemento estándar fabricado por la ABCP. Este cemento atiendo a los requisitos solicitados por la norma brasileña del método acelerado de las barras de argamasa, presentando expansión en autoclave inferior a 0,20 %, un tenor de equivalente alcalino total expresado en $(0,90 \pm 0,10)$ % y finura de (4900 ± 200) cm²/g, conforme especifica la Tabla 3.

Tabla 3. Características del cemento estándar.

Propiedad	Método de ensayo	Resultado	Especificación
Óxido de sodio (Na ₂ O)	NBR NM 17	0,32 %	---
Óxido de potasio (K ₂ O)	NBR NM 17	0,91 %	---
Equivalente alcalino en Na ₂ O*	---	0,92 %	$(0,90 \pm 0,10)$ %
Área específica Blaine	NBR NM 76	4890 cm ² /g	(4900 ± 200) cm ² /g
Expansibilidad en autoclave	ASTM C 151	0,02 %	< 0,20 %

(*) Equivalente alcalino en Na₂O: $Na_2O_{eq} = 0,658 K_2O \% + Na_2O \%$.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De acuerdo con el análisis petrográfico, solamente la Muestra 6 presentó el tipo de piedra o roca ígnea, mientras que las demás muestras exhibieron el tipo metamórfica.

Se verificó que todas las seis muestras de rocas presentaron clasificación de potencialmente reactiva a los álcalis del hormigón, de acuerdo con el método petrográfico (NBR 15577-3). La Tabla 4 presente, de manera resumida, las principales características mineralógicas, naturaleza de la muestra y clasificación petrográfica de las seis muestras de rocas o piedras.

Tabla 4. Resumen de los resultados del análisis petrográfico de las seis muestras de rocas.

Identificación de la muestra	Naturaleza	Clasificación petrográfica	Mineralogía y observaciones
Muestra 1	Metamórfica	Protomilonito calcio-silicato	<ul style="list-style-type: none"> • Cuarzo microcristalino (>5%), feldespatos alterados (>5%) y cuarzo con ángulo de extinción de 15 (>5%) • Textura milonítica • Granulación media a gruesa, con matriz fina • Cuarzo deformado (ángulo de extinción ondulante, 15°) • Presencia de biotita
Muestra 2	Metamórfica	Protomilonito	<ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos alterados y cuarzo microcristalino (>5%) • Presencia de biotita • Textura milonítica • Media a gruesa, con matriz fina • Roca poco alterada (feldespatos sericitizados) • Microclino presente en la matriz y cuarzo poligonizado
Muestra 3	Metamórfica	Milonito	<ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos alterados (>5%), cuarzo microcristalino (>5%) • Textura milonítica • Granulación fina con pórfiros medios a gruesos • Medianamente alterada (feldespatos sericitizados y algunos cubiertos por opacos pulverizados) • Roca sumamente deformada • Presencia de biotita
Muestra 4	Metamórfica	Biotita gneis	<ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos alterados (>5%), cuarzo microcristalino (1a 5%), cuarzo con extinción ondulante (entre 25° y 30°) (>5%) • Textura granoblástica • Granulación fina a media • Presencia de biotita • Roca poco alterada (feldespatos sericitizados)
Muestra 5	Metamórfica	Biotita gneis	<ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos alterados (>5%), cuarzo microcristalino (1a 5%), cuarzo con ángulo de extinción de 15° (>5%) • Estructura gnéisica • Textura granoblástica • Granulación fina a intermedia • Roca poco alterada (feldespatos sericitizados) • Presencia de biotita
Muestra 6	Ígnea	Biotita granito cataclasado	<ul style="list-style-type: none"> • Feldespatos alterados (>5%), cuarzo microcristalino (1a 5%), cuarzo con ángulo de extinción de 10° (>5%) • Presencia de biotita • Textura granular hipidiomórfica • Granulación intermedia a gruesa • Piedra/roca poco alterada (feldespatos sericitizados)

La Figura 1 muestra los resultados del método acelerado de las barras de argamasa que fueron analizados relacionando el porcentaje de expansión de las barras con el pasar del tiempo, de manera de clasificar la potencialidad relativa de los agregados a través del límite de expansión por las normas ASTM C 1260 (2005) & NBR 15577- 4 (2008) & CSA A23.2-25A (1994).

De acuerdo con la ASTM C 1260 (2005), las barras que presenten expansiones intermedias inferiores a 0,10 % a los 14 días, a partir de la lectura inicial están constituidas de agregado inocuo. Cuando las expansiones a los 14 días son superiores a 0,20%, se trata de un comportamiento deletéreo. Si las expansiones son superiores a 0,10% e inferiores a 0,20% en esta edad, se tiene un comportamiento potencialmente deletéreo.

La NBR 15577-4 (2008) considera que en las barras que presentan expansiones intermedias inferiores a 0,19% a los 28 días, a partir de la lectura inicial, los agregados se clasifican como inocuos. En las barras con expansiones mayores o iguales a 0,19% a los 28 días, los agregados se consideran reactivos.

La norma canadiense CSA A23.2-25A (1994) establece que expansiones inferiores a 0,15% a los 14 días se consideran inocuas y expansiones mayores a 0,15% en la misma edad se consideran reactivas.

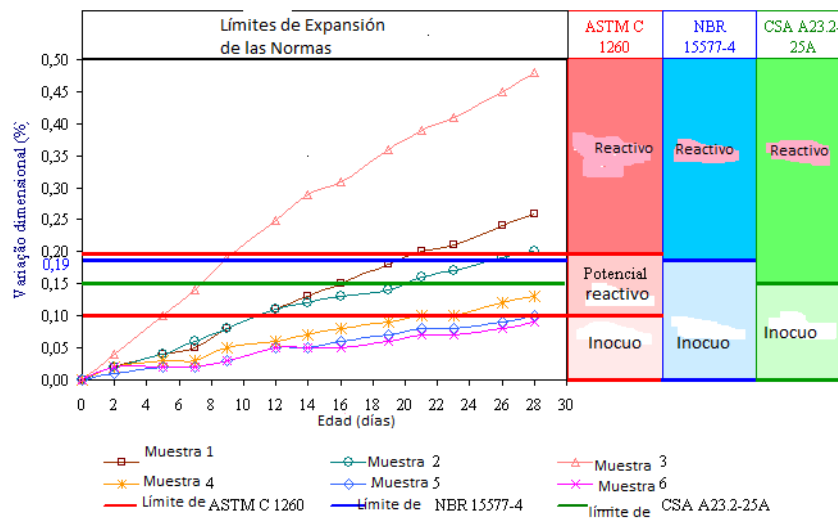


Figura 1. Promedio de las expansiones de las barras de acuerdo con la ASTM C 1260 (2005), NBR 15577-4 (2008) y CSA 23.2-25A (1994).

Se puede constatar que las muestras que presentan mayores cantidades de cuarzo microcristalino (Muestras 1, 2 y 3), tuvieron las mayores expansiones en el ensayo acelerado, comprobando que los cristales microcristalinos intervienen en la potencialidad de los agregados.

Las Figuras 2 y 3 muestran la microscopia óptica de luz transmitida de las dos muestras que presentaron mayores expansiones, donde se observa la masa triturada (M) bordeando los minerales mayores de feldspatos (F).

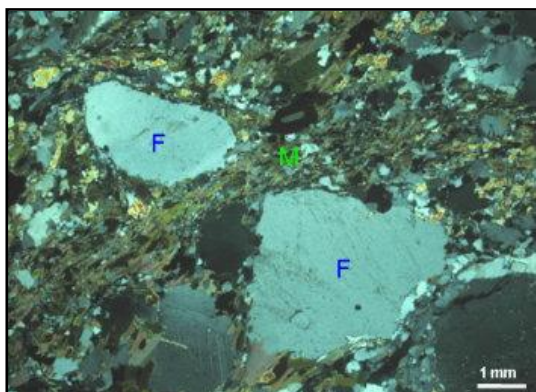


Figura 2. Análisis petrográfico de la Muestra 1.

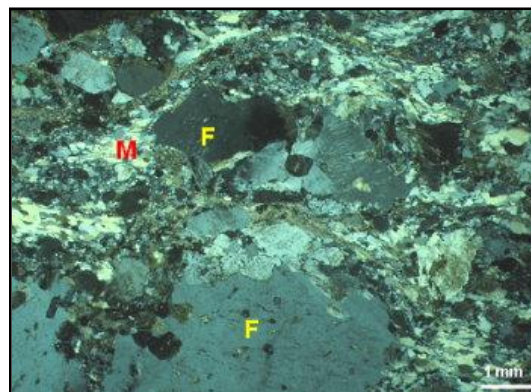


Figura 3. Análisis petrográfico de la Muestra 3. Ampliación 10x.

En todas las muestras de agregados se observó la presencia de feldespatos alcalinos y cuarzo. Los feldespatos se presentan alterados en todas las muestras, en una proporción mayor que 5 %. La presencia de feldespatos alcalinos puede haber contribuido para el aumento de la potencialidad reactiva de los agregados, pues algunos autores sospechan que este mineral puede liberar álcalis en la solución del hormigón.

Uno de los minerales subordinados observados en las seis muestras fue la biotita. Este mineral puede también haber contribuido para el aumento de la potencialidad reactiva de los agregados, puesto que se imagina que existe la posibilidad de liberación de álcalis por la biotita.

Las mayores expansiones de las barras, desde las primeras edades, se produjeron con la Muestra 3, pues es notorio que uno de los motivos de dicho comportamiento se debió al hecho de que la referida muestra posee gran cantidad de sílice bajo la forma de granos de cuarzo sumamente deformados. Ello comprueba que, cuanto más finos fueren los cristales de cuarzo presentes en la muestra, más expansiva se torna la misma.

Las muestras 4 y 5, recogidas en el mismo municipio, pero no obstante extraídas de canteros localizados a una distancia significativa, presentaron resultados de expansiones próximas entre sí en el ensayo acelerado. Esto se debe al hecho de que esas muestras presentan mineralogías deletéreas semejantes y obtienen la misma clasificación petrográfica (biotita gneis), exhibiendo los mismos resultados de reactividad potencial en el análisis petrográfico.

A pesar de que el ensayo acelerado realizado con la Muestra 6 no haya exhibido expansión deletérea, el análisis petrográfico de la roca en cuestión presentó cuarzo deformado, cuarzo microcristalino y cuarzo con extinción ondulante. Tales características de las rocas son indicios de que la misma fue sometida a esfuerzos tectónicos y, en consecuencia, presentan reactividad.

A pesar de que algunas barras presentaron expansiones significativas en el ensayo acelerado, ninguna de las mismas exhibió fisuras en su superficie, pudiendo observarse la presencia de poros conteniendo gel blancuzco.

Comparándose la clasificación de la reactividad del análisis petrográfico con la reactividad de las normas de expansión, se constató que:

- Las muestras 1 y 2 fueron clasificadas por medio de la norma norteamericana a los 14 días como potencialmente reactivas y a los 28 días como reactivas. Sin embargo, esas muestras fueron clasificadas por medio de la norma canadiense a los 14 días como inocuas. Cuando analizadas a través de la norma brasileña, esos agregados presentaron comportamiento reactivo. Las referidas muestras fueron consideradas potencialmente reactivas a través del análisis petrográfico;
- La muestra 3 fue clasificada como reactiva de acuerdo con las tres normas de expansión utilizadas, presentando comportamiento potencialmente reactivo en el análisis petrográfico;
- Las muestras 4 y 5 fueron clasificadas a los 14 días como inocuas y a los 28 días como potencialmente reactivas a través de la norma norteamericana. Cuando fueron analizadas a través de las normas brasileña y canadiense, las muestras presentaron comportamiento inocuo. Estas muestras fueron consideradas potencialmente reactivas a través del análisis petrográfico;
- La muestra 6 fue clasificada como inocua por todas las normas utilizadas en el ensayo de expansión, presentando comportamiento potencialmente reactivo en el análisis petrográfico.

La tabla 5 muestra el resumen de la clasificación de los agregados de acuerdo con el análisis petrográfico y las tres normas del método acelerado de las barras de argamasa, en cuanto a la potencialidad reactiva de los mismos.

Tabla 5 – Clasificación de los agregados de acuerdo con el análisis petrográfico y las tres normas del método acelerado.

Identificación de las muestras	Expansión (%)		Clasificación petrográfica					
			Análisis petrográfico	Método acelerado de las barras				
	14 días	28 días		ASTM C 1260		NBR 15577-4	CSA A23.2-25A	
				14 días	28 días	28 días	14 días	28 días
Muestra 1	0,130	0,260	Potencialmente reactivo	Potencialmente reactivo	Reactivo	Reactivo	Inocuo	Reactivo
Muestra 2	0,120	0,200	Potencialmente reactivo	Potencialmente reactivo	Reactivo	Reactivo	Inocuo	Reactivo
Muestra 3	0,290	0,480	Potencialmente reactivo	Reactivo	Reactivo	Reactivo	Reactivo	Reactivo
Muestra 4	0,070	0,130	Potencialmente reactivo	Inocuo	Potencialmente reactivo	Inocuo	Inocuo	Inocuo
Muestra 5	0,050	0,100	Potencialmente reactivo	Inocuo	Potencialmente reactivo	Inocuo	Inocuo	Inocuo
Muestra 6	0,050	0,090	Potencialmente reactivo	Inocuo	Inocuo	Inocuo	Inocuo	Inocuo

CONCLUSIONES

Se concluye que el análisis petrográfico se consideró indispensable en la investigación de la reactividad potencial de las muestras, complementando de manera significativa el ensayo de las expansiones de las barras de argamasa.

Las muestras que presentaron mayores expansiones en el ensayo acelerado exhibieron mayores cantidades de cuarzo microcristalino en el análisis petrográfico, constatando que el cuarzo microcristalino interfiere significativamente en la reactividad de los agregados. De esta manera, quedó evidente que, cuanto mayor la cantidad de cuarzo microcristalino, mayores serán las expansiones.

La potencialidad reactiva indicada en las muestras de piedras en el ensayo del análisis petrográfico se relaciona básicamente con la presencia de cuarzo microcristalino, feldespatos alterados y cuarzo deformado, evidenciando deformaciones tectónicas sufridas por las piedras.

El método acelerado se mostró apropiado con relación a la posibilidad de hacer ensayos de varios agregados a través de varias normas del mismo método; no obstante, no se mostró seguro por presentar resultados de reactividad distintos, dependiendo de los límites de expansión de cada norma utilizada.

Todas las muestras presentaron comportamiento potencialmente reactivo en el análisis petrográfico, con comprobación de la existencia de fases reactivas, sin embargo la misma clasificación de reactividad no fue encontrada en algunas muestras de agregados ensayados por el método de las barras.

Frente a lo expuesto, es aconsejable la realización de nuevos estudios utilizando otros métodos que vengan a auxiliar en el comportamiento del agregado en cuanto a la reactividad potencial, así como proponer nuevos métodos de ensayo que presenten mayor confiabilidad cuando se utilizan los agregados en estructuras de hormigón.

REFERENCIAS

Andrade, T. & Silva S, J. J. R. & Hasparyk, N. P. & Silva, C. M. 2006. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na Região Metropolitana do Recife. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EN ESTRUTURAS DE CONCRETO, R o de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006.

Annual Book of ASTM Standards - ASTM C 1260/2005: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Filadelfia, 2005.

Associa o Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577-3/2008: análise petrográfica para verifica o da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. R o de Janeiro, 2008.

Associa o Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15577-4/2008: determina o da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. R o de Janeiro, 2008.

Bellew, G. P. E. A. 1997. Critical Review of Ultra Accelerated Tests for Alkali-Silica Reactivity. Cement and Concrete Composites, vol. 19, p. 403-414.

Canadian Standards Association. CSA A23.2-25A/1994. Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars. Canadian Standards Association, Rexdale, Canadá. 1994.

Figueir a, J. P. & Andrade, T. 2007. O ataque da rea o álcali-agregado sobre as estruturas de concreto. A descoberta pioneira da ocorrência do problema em funda es de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife. Editora Universitária UFPE.

Hasparyk, N. P., et al. 2008. Comportamento reactivo de agregados brasileiros do ponto de vista da reação álcali-agregado. In: 50º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. IBRACON. Salvador – BA. Anais... São Paulo: IBRACON, 2008. 1 CD-ROM.

Sanchez, L. F. M. 2008. Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.

Valduga, L. 2002. Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo. Disertación (Maestría en Construcción Civil) - Universidad Estadual de Campinas.