

Caracterización de los componentes mineralógicos de gravas y arenas con influencia en la reacción álcali-sílice, utilizando barras de mortero

Characterization of the mineralogical components of gravels and sands with influence on the alkali-silica reaction, using mortar-bars test

Carlos H. Lora-Urías^{*1,2}, Olimpia Alvarado-Fierro^{1,2}, Adalberto Soto-Grijalva^{1,2}, Roger U. Hernández-Zamora¹

RESUMEN

La reacción álcali-agregado, en su variante álcali-sílice, tiene variados minerales que influyen en la reactividad y que poco se sabe de su comportamiento expansivo al mezclarse con los componentes químicos del cemento Portland; por ello, se buscó caracterizar su comportamiento expansivo en el tiempo, hasta los 120 días y analizar los efectos causantes en morteros cuando hay presencia unitaria de minerales reactivos o combinaciones de ellos; tal que, esos minerales reactivos están presentes en los agregados (gravas y arenas) provenientes de bancos de materiales de río (naturales canto rodado) o de mesetas (procesados por trituración) ubicados en el Estado de Chihuahua, México. La caracterización se realizó midiendo expansiones longitudinales con el método de prueba de la barra de mortero (Norma ASTM C-1260); donde los resultados manifiestan que los minerales calcedonia, cuarzo y ópalo, solos o combinados, son los que desarrollan mayores expansiones deletéreas a edades tempranas en los morteros.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction, in its alkali-silica variant, has various minerals that influence the reactivity and little is known about its expansive behavior when mixed with the chemical components of Portland cement; therefore, it was sought to characterize its expansive behavior over time, up to 120 days and to analyze the causative effects in mortars when there is a unit presence of reactive minerals or combinations of them; such that, these reactive minerals are present in aggregates (gravels and sands) from banks of river materials (natural pebbles) or hill (processed by crushing) located in the State of Chihuahua, Mexico. The characterization was performed by measuring longitudinal expansions with the mortar bar test method (ASTM C-1260 Standard); where the results show that the minerals of chalcedony, quartz and opal, alone or in combination, are the ones that develop the greatest deleterious expansions at early ages in mortars.

Recibido: Agosto 2025
Aceptado: Diciembre 2025
Publicado: Diciembre 2025

Palabras Clave:

Reacción álcali-sílice, expansiones, mortero, minerales reactivos

Keywords:

Alkali-Silica Reaction, expansions, mortar, reactive minerals

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad de las estructuras de concreto y/o elementos de mortero se afecta por diversas acciones o procesos de deterioro; una de las condiciones desfavorables que producen los daños más comunes son las reacciones químicas, dado que son causales de la devastación de elementos contruidos con concreto o con mortero, que en el menor de los casos, provocan microfisuras y agrietamientos debido a expansiones.

*Carlos H. Lora-Urías, dirección de correo electrónico: carlora@uas.edu.mx

¹ Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P. 80040, Culiacán, Sinaloa, Méx.

² Estudiante de Doctorado en Ciencias, Centro de Estudios "Justo Sierra".

Dentro de las reacciones químicas se tiene a la reacción álcali-agregado, la que manifiesta dos variantes; 1) álcali-sílice y 2) álcali-carbonato. La primera de ellas, es decir, la reacción álcali-sílice (ASR, por sus siglas en inglés) es la reacción que se ha estudiado mayormente dada su influencia en la durabilidad del concreto o del mortero. La ASR es un proceso químico desarrollado de forma intrínseca en el concreto o en el mortero en estado endurecido, desarrollando deterioros que afectan la durabilidad del material, por ende, reduciendo su vida útil [1], [2]. En este fenómeno químico, los álcalis (de sodio y potasio) presentes en el cemento Portland o en algunos aditivos, reaccionan con la sílice de los agregados (gravas y/o arenas), que en condiciones de elevadas humedades internas o externas, desarrollan un gel dañino que permite el desarrollo de expansiones [1], [2], [3]. Tales expansiones se muestran como fisuras que pueden variar desde microfisuras hasta agrietamientos de tamaños importantes; el patrón de agrietamientos es en forma de red o mapa, en el que las fisuras interconectadas intensifican su efecto y reducen la cohesión del concreto [4]. El contenido de sílice en ciertos agregados es considerado el factor principal para el desarrollo de la ASR [5].

Recientemente, se ha demostrado que la ASR también tienen influencia en el deterioro del acero utilizado como elemento de refuerzo en el concreto [3] promoviendo la corrosión de las barras de acero.

Resulta de gran importancia realizar estudios de caracterización del comportamiento de los componentes mineralógicos de los agregados usados en la fabricación del concreto o del mortero, en aras de visionar sus aspectos de durabilidad. Se han realizado algunas investigaciones de áreas muy particulares, o bien, muy localizadas [6], [7]; más no a un nivel regional.

En México son más escasos tales estudios, por tal motivo, se establece esta investigación regional, donde se caracteriza el potencial reactivo álcali-sílice en gravas y arenas de la región del Estado de Chihuahua, México; con bancos de materiales de diversa índole, algunos cantos rodados de ríos y otros procesados triturados de cerros o mesetas, todos provenientes de las dos principales regiones fisiográficas que prevalecen en el Estado de Chihuahua: la región fisiográfica de serranía y la de llanura.

Se caracteriza la reacción álcali-sílice en algunos bancos de gravas y arenas del Estado de Chihuahua, usando los criterios del Método de Expansión en Ba-

rras de Mortero, establecido por la Norma ASTM C-1260.

2. METODOLOGÍA

Reacción Álcali-Sílice

Esta reacción química se presenta en el interior del concreto o del mortero, al generarse un medio alcalino por la combinación del cemento Portland con el agua; dentro de este medio, se encuentran los agregados, es decir, las partículas de gravas y arenas; las cuales están constituidas por minerales y rocas que reaccionan químicamente al contacto con los álcalis del cemento, desarrollando un gel, que al absorber agua, se expande y provoca presiones tan vastas que disgregan a los elementos estructurales de las obras civiles.

Estas reacciones químicas que se producen al interior del concreto o del mortero, en estado endurecido, constituyen un ejemplo claro de la incompatibilidad química entre el cemento y los agregados (gravas y arenas) en presencia de alta humedad, provocando un deterioro prematuro de los elementos estructurales de las obras civiles, debido a la disminución sustantiva de la capacidad de carga de tales elementos; siendo evidente que las propiedades mecánicas del mortero o del concreto se ven comprometidas, entre ellas están: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión y a la flexión.

Para que la reacción álcali-sílice se presente, son necesarias el cumplimiento de ciertas condiciones:

- Que las gravas y arenas contengan rocas y minerales reactivos con los álcalis.
- Que las gravas y arenas se mezclen con cementos altos en álcalis ($>0.6\%$).
- Que exista en el ambiente, porcentajes altos de humedad.

Cabe aclarar, que tiempo atrás, se pensaba que las altas temperaturas medioambientales también aportaban condicionantes para el desarrollo de la reactividad.

Los daños que se generan por la reacción son un proceso derivado por la formación de sus productos (gel) los cuales desarrollan expansiones que derivan en fisuras y agrietamientos. Esos agrietamientos que se manifiestan en el concreto endurecido, al presentarse esta reacción química, adoptan un patrón de red o mapa [6] donde todas las fisuras y grietas logran una interconexión que maximiza su efecto y reduce la cohesión de los elementos del concreto endurecido, algo que puede llevarlo a disgregarlo por completo. Algunos minerales y rocas consideradas reactivas son

el ópalo, la calcedonia, el vidrio de sílice y la grauvaca [2], [8]. Cabe destacar, que algunos agregados considerados no reactivos, pudieran desarrollar reactividad con el tiempo, pero bajo la acción de cargas físicas, químicas o mecánicas [8].

El desarrollo de la metodología experimental de este estudio, está basado en las Normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), específicamente en la Norma ASTM C-1260 [9], la cual tiene por nombre “Método de la Prueba Estándar para la Reactividad del Potencial Alkali-Agregado, Método de la Barra de Mortero”. Este método permite detectar, en laboratorio, el deterioro de la reacción álcali-sílice en gravas y arenas dentro de un plazo de 16 y 28 días en barras de mortero, pero se extendió este lapso hasta los 120 días, con el objetivo de caracterizar adecuadamente su comportamiento en el tiempo.

Banco de materiales

Los bancos de agregados de gravas y arenas elegidos para este estudio, son los que con el Método Químico [10], la Examinación Petrográfica y la Examinación por Difracción de Rayos X [11], marcaron una conducta potencialmente reactiva, resultando un total de 12 bancos de gravas y 13 bancos de arena, los cuales se enlistan en la Tabla 1.

Tabla 1. Bancos de materiales muestreados en el Estado de Chihuahua, México.

GRAVAS		ARENAS	
Clave	Nombre	Clave	Nombre
3G	Nuevo Casas Grandes	2A	Ciudad Juárez
4G	La Mula, Ojinaga	3A	Nuevo Casas Grandes
5G	El Tecolote, Ojinaga	4A	La Mula, Ojinaga
6G	Gómez Farías	6A	Gómez Farías
8G	La Junta	8A	La Junta
9G	Guerrero	9A	Guerrero
10G	Tomochi	10A	Tomochi
15G	Meoqui	14A	Santa Isabel
16G	Saucillo	17A	Saucillo
20G	Las Cuevas, Camargo	22A	Bocoyna
22G	Bocoyna	23A	Jiménez
24G	Rocheachi	24A	Rocheachi
		26A	Parral

Preparación de las muestras de grava y arena

Todas las muestras de grava se sometieron a un tratamiento previo de triturado por impactos, a 500 revoluciones en la “Máquina de Abrasión Los Ángeles”, donde se obtuvo un material con una granulometría suficiente (la que pasa la malla o tamiz #4) reconvertida en arena para poder elaborar las barras de mortero.

En el caso de las arenas no hubo necesidad de realizar el proceso de trituración, dado que su granulometría es la adecuada para la elaboración del mortero.

Una vez concluida la preparación del material, se aplicó el proceso de homogeneización y cuarteo [12], como lo designa la Norma ASTM C-702.

Selección del cemento de referencia

El cemento de referencia utilizado para la elaboración de las barras de mortero es un cemento Portland, con álcalis totales (de sodio y potasio) de 0.9345%, según la prueba de Fluorescencia de Rayos X. Es un cementante del tipo CPC 30R, de marca comercial, envasado en sacos de 50 kg; tamizado a través de la malla No. 20, con el objeto de remover residuos gruesos e impurezas que pudiese afectar su comportamiento en la prueba de la barra de mortero.

Preparación de los especímenes de prueba

Se fabrican 3 especímenes de prueba, por cada uno de los bancos de materiales, con la finalidad de observar en los resultados, discrepancias o alteraciones severas entre ellos.

Se prepararon los moldes para cada espécimen de prueba de acuerdo con los requerimientos de la Norma ASTM C-490 [13]. La superficie interna de cada molde se cubrió con un reactivo de liberación (cinta de teflón), dado que esta cinta no afecta al compuesto del cemento y permite fácilmente la penetrabilidad del agua o de la solución reactiva hacia el espécimen.

El diseño de la mezcla del mortero se realizó con lo dispuesto en la Norma ASTM C-1260 [9]. Se diseña en base de su peso, donde las cantidades de materiales para elaborar 3 barras de mortero fueron: 440 gramos de cemento; 900 gramos del agregado; una relación agua/cemento igual a 0.47, por lo que se utilizaron 207 ml de agua. Estas proporciones de materiales son fijas para cada uno de los bancos de agregados, tanto para los de arena como para los de grava.

La mezcla del mortero se desarrolla acorde con lo prescrito en la Norma ASTM C-305 [14] y se utiliza un mezclador automático de mortero (véase Figura 1). Una vez realizada la mezcla del mortero, los moldes se

rellenan en dos capas, compactándose con un pisón de caucho y suavizándose con una llana metálica, como lo designa la Norma ASTM 109/C109M [15].



Figura 1. Mezclador de mortero.

Procedimiento para desarrollar de la prueba

Se colocaron los moldes en el cuarto de humedad inmediatamente después que se concluye su llenado. Los especímenes permanecen en él por 24 horas; posteriormente, se desmoldan y protegen de pérdida de humedad; se identifica apropiadamente y se toma su lectura inicial de comparación.

Con la identificación de cada una de las barras de mortero, se sitúan dentro de un contenedor con agua, se sellan con una tapa hermética y se colocaron dentro del horno de almacenamiento (véase Figura 2) por 24 horas a 80°C; después se retiran del horno y se obtiene la lectura cero.

Las lecturas iniciales, las lecturas cero, así como todas las lecturas subsecuentes se realizaron con un comparador de longitud digital. Dicho comparador, está provisto con un micrómetro electrónico y una barra de referencia con un coeficiente de dilatación térmica no mayor de dos milésimas de grados centígrados.

La solución reactiva de hidróxido de sodio (NaOH), se elabora con 40 gramos de NaOH disueltos en 900 mm de agua y se diluye con 100 mm de agua destilada adicional, para obtener el total de un litro de solución reactiva. Después de realizadas las tomas de lecturas cero, los especímenes se colocan en los mismos con-

tenedores, pero ahora con solución reactiva de NaOH, se sellan nuevamente y se colocan en el horno a 80°C; permanecen en tales condiciones durante 120 días, sólo se extraen para el proceso de lecturas subsecuentes. Se toman lecturas subsecuentes periódicamente, durante 14 días después de la lectura cero, se toma otra lectura en un periodo de 14 días adicionales y después se tomaron semanalmente hasta cumplir con los 120 días propuestos, buscando caracterizar mejor su comportamiento reactivo.



Figura 2. Horno de almacenamiento.

Cálculos e interpretación de los resultados

Para calcular los cambios de longitud de las barras de mortero, a cualquier tiempo, se aplica la ecuación (1) designada por la Norma ASTM C-490 [13]:

$$L = \frac{(Lx - Li)}{G} 100 \quad (1)$$

Donde “L” es el cambio de longitud en un tiempo x, “Lx” es la lectura del comparador en ese mismo tiempo x, “Li” es la lectura inicial y “G” en la longitud nominal del ancho del molde, es una constante y tiene un valor de 10.

Después de realizar los cálculos, se procede a la interpretación de los resultados de las expansiones; las que resultan menores a 0.10%, a los 16 días, indican una conducta inocua; expansiones entre 0.10 y 0.20% indican una conducta dudosa, por lo que se recomienda obtener información complementaria, entre ella: la petrografía, la examinación de núcleos en obras con daños y una exhaustiva examinación en campo; las

expansiones mayores a 0.20%, a los 16 días, marcan una conducta potencialmente reactiva.

3. RESULTADOS

Resultados de los agrietamientos

Los agrietamientos desarrollados a largo plazo, es decir, a una edad de 120 días, en las barras de mortero grava-cemento, de algunos bancos de materiales se muestran gráficamente en las Figuras 3 y 4. Los de las barras de mortero arena-cemento en las Figuras 5 y 6.

En el caso de los agregados gravas:



Figura 3. Agrietamientos a los 120 días de los bancos de materiales 5G, 6G, 9G y 15G.



Figura 4. Agrietamientos a los 120 días de los bancos de materiales 3G, 4G, 8G, 16G y 20G.

En el caso de los agregados de arena:



Figura 5. Agrietamientos a los 120 días de los bancos de materiales 3A, 4A y 8A.



Figura 6. Agrietamientos a los 120 días de los bancos de materiales 14A y 17A.

En el caso de los bancos de materiales de arena, dos de los bancos de materiales, sus barras de mortero presentaron deformación por pandeo de aproximadamente 1.0 cm, a la edad de 120 días (véanse las Figuras 7 y 8).



Figura 7. Deformación por pandeo a los 120 días del banco de materiales 3A.

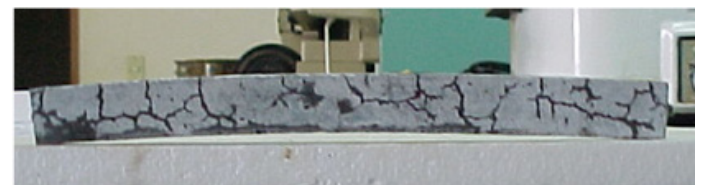


Figura 8. Deformación por pandeo a los 120 días del banco de materiales 4A.

Resultados de las expansiones

Los resultados de las expansiones de las barras de mortero de los bancos de materiales de grava, se enlistan en la Tabla 2; asimismo, los correspondientes a los bancos de materiales de arena se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Resultados de las expansiones de las barras de mortero, a los 120 días, de los bancos de materiales de grava.

Banco	Expansión a los 16 días			Expansión a los 120 días		
	Barra	Barra	Barra	Barra	Barra	Barra
	1	2	3	1	2	3
3G	0.030	0.205	0.226	0.839	0.929	0.855
4G	0.601	0.623	0.593	1.331	1.356	1.346
5G	0.514	0.484	0.270	1.026	0.975	0.710
6G	0.085	0.077	0.075	0.298	0.317	0.326
8G	0.179	0.218	0.188	0.869	1.067	0.841
9G	0.108	0.103	0.097	0.520	0.461	0.465
10G	0.148	0.153	0.157	0.466	0.463	0.467
15G	0.253	0.237	0.238	0.735	0.764	0.703
16G	0.017	0.282	0.248	0.608	0.815	0.802
20G	0.397	0.345	0.368	1.230	1.113	1.102
22G	0.079	0.085	0.085	0.296	0.282	0.269
24G	0.077	0.080	0.088	0.251	0.278	0.308

Tabla 3. Resultados de las expansiones de las barras de mortero, a los 120 días, de los bancos de materiales de arena.

Banco	Expansión a los 16 días			Expansión a los 120 días		
	Barra	Barra	Barra	Barra	Barra	Barra
	1	2	3	1	2	3
2A	1.006	1.037	1.041	1.319	1.350	1.350
3A	0.462	0.485	0.192	1.905	2.060	1.847
4A	0.559	0.512	0.461	1.826	1.790	1.787
6A	0.176	0.192	0.214	0.839	0.910	0.873
8A	0.352	0.272	0.275	1.801	1.506	1.619
9A	0.421	0.449	0.402	1.331	1.568	1.792
10A	0.419	0.562	0.619	0.919	0.955	1.133
14A	0.541	0.487	0.466	1.358	1.319	1.296
17A	0.682	0.826	0.758	1.700	1.792	1.764
22A	0.000	0.001	0.089	0.262	0.021	0.412
23A	0.657	0.580	0.566	1.548	1.617	1.472
24A	0.460	0.467	0.455	1.167	1.122	1.122
26A	0.108	0.081	0.084	0.460	0.392	0.413

4. DISCUSIÓN

La presente investigación tuvo como objetivo caracterizar el comportamiento reactivo álcali-sílice de agregados de grava y arena utilizando la prueba de la “Barra de Mortero”.

Posterior al acopio de datos de las expansiones de las barras de mortero y realizó su análisis.

De los bancos de gravas:

El 45% resultó con una expansión de deterioro potencial a los 16 días y el 100% resultó hasta los 79 días. De los bancos de arenas el 90% resultó con una expansión de deterioro potencial a los 16 días y el 100% a los 72 días.

Las combinaciones de rocas reactivas “cuarzo con andesita” y “cuarzo con líticos riolíticos”, producen un proceso reactivo muy lento. Pero la combinación de “cuarzo con calcedonia” es muy deletérea y desarrolla un proceso reactivo muy rápido.

La multicombinación de “andesita con calcedonia con cuarzo con líticos riolíticos con líticos andesíticos con ópalo”, producen reactividades bajas a edades tempranas (16 días), pero a largo plazo (120 días) aumentan considerablemente su reactividad.

El contenido de cuarzo entre el 12 y 30%, producen expansiones en las barras de mortero del orden de 0.20 a 0.50%.

Calcedonia presentes entre el 1 y 12%, producen expansiones entre el 0.20 y 0.50% en las barras de mortero. Los líticos riolíticos entre 1.5 y 13%, producen expansiones entre 0.20 y 0.25%. La combinación de cuarzo con calcedonia entre 8 y 35%, producen expansiones en las barras de mortero entre 0.20 y 0.60%.

Para bancos de arena:

Las combinaciones de rocas reactivas “cuarzo con líticos riolíticos”, produce una reacción muy deletérea y rápida, al igual que la combinación de “cuarzo con calcedonia”. Cuando se tienen la tricombinación de “cuarzo con andesita con líticos riolíticos” se desarrolla un proceso reactivo muy lento.

Las más altas expansiones se dan en la combinación de cuarzo con calcedonia (60%); en andesita con cuarzo con líticos riolíticos (50%); en cuarzo con líticos riolíticos (45%); en andesita con líticos riolíticos (40%).

De estos bancos de materiales, el 70% presentaron deformaciones por pandeo a los 51 días en un rango de 0.11 a 0.53 cm, y a los 120 días las barras presentaron deformaciones de aproximadamente un centímetro.

Se observó, en la mayoría de los casos, que entre más alto sea el contenido de rocas reactivas, mayor será la expansión de las barras de mortero a los 16 días.

Así también, los bancos de materiales (gravas y arenas) que son de origen de meseta (procesado triturado), resultaron más reactivos que lo de origen de río (natural canto rodado).

5. CONCLUSIONES

La presente investigación fortalece la importancia de estudiar a la reactividad álcali-sílice, dado que trasgrede la durabilidad de las obras civiles que se construyan con agregados reactivos.

Los objetivos planteados al inicio se cumplieron, ya que se logra ahora conocer el comportamiento reactivo de los agregados a través del tiempo.

Concluyendo, los aportes más relevantes que hace este estudio de bancos de materiales ubicados a nivel regional son:

La presencia unitaria de los minerales cuarzo, calcedonia y ópalo en los agregados, desarrollan expansiones de deterioro potencial muy grandes y a edades tempranas.

La bicombinación de los minerales: cuarzo con calcedonia, intrínsecos en los agregados; producen procesos reactivos muy deletéreos a temprana edad.

La multicombinación de minerales: cuarzo, calcedonia, ópalo, líticos riolíticos y líticos andesíticos, como componentes de los agregados; generan reactividad baja a edades tempranas, pero a largo plazo aumentan considerablemente su potencial reactivo.

Los agregados de los bancos de arena, desarrollan deformaciones por pandeo que inicia a edades medias, pero aumentan significativamente a largo plazo.

En promedio, a edades medias, todos los bancos de materiales (gravas y arenas) manifiestan expansiones de deterioro potencial, por lo tanto, con los resultados obtenidos utilizando el “Método de la Barra de Mortero”, confirman los resultados de investigaciones anteriores con “Examinación Petrográfica” y con el “Método de Difracción de Rayos X” desarrollados por autor Almaral [11] y con el “Método Químico” desarrollado por el autor Caballero [10], que el 100% de los bancos de materiales investigados, son potencialmente reactivos, ante la reactividad álcali-sílice.

Lo anterior nos lleva a pensar que hacen falta más investigaciones, por lo que se sugiere realizar pruebas de inmersión rápida que establece la Norma AASHTO

TP-14 para reconfirmar la reactividad álcali-sílice de estos agregados.

Se recomienda realizar examinaciones petrográficas de láminas delgadas de las barras de mortero e impregnarlas con tinta activa fluorescente para observar el desarrollo del gel expansivo.

Se propone realizar pruebas de laboratorio con agentes mitigantes de la reacción, entre otros: las sales de litio, escoria de alto horno, humo de sílice y fly ash; para observar su comportamiento inhibitor. 6.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa por las facilidades otorgadas. A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua por su apoyo en el muestreo y experimentación; especialmente a la Dra. Cecilia Olague y al Dr. Gilberto Wenglas. Al Grupo Cementos de Chihuahua y a su Departamento de Laboratorio y de Asistencia Técnica.

REFERENCIAS

- [1] M. Pathirage; B.Q. Zhang; M. Alnaggar; G. Cusatis, “Confinement and alkali-silica reaction en concrete”, International Journal of Solids and Structures, 2023.
- [2] C. H. Lu; S. Z. Bu; Y. L. Zheng; K. Kosa, “Deterioration of concrete mechanical properties and fracture of steel bars caused by alkali-silica reaction: a review”, Structures, 2022.
- [3] R. B. Figueiras; R. Sousa; L. Coelho; M. Azenha; J. M. De Almeida; P. A. S. Jorge; C. J. R. Silva, “Alkali-Silica reaction in concrete: mechanisms mitigation and methods”, Construction and Building Materials, 2019.
- [4] A. Mohammadi; E. Ghiasvand; M. Nili. “Relation between mechanical properties of concrete and alkali-silica reaction (ASR) a review. Construction and Building Materials, 2020.
- [5] K. H. Mo; T.C. Ling; T. H. Tan; G. W. Leong; C. W. Yuen; C. N. Shah. “Alkali-Silica reactivity of lightweight aggregate: A brief overview”. Construction and Building Materials, 2021.
- [6] T. Powers; H. Stenour, “An interpretation of some published research on alkali-aggregate reaction and me-

chanisms of expansion”, Journal of the American Concrete Institute, 1995.

[7] B. Wigum; J. Lindgard, “Test methods for alkali-aggregate reaction in Norwegian aggregate: petrographic examination and the South African NBRI Mortar-Bar test, durability of concrete”, Fourth International Conference, CANMET/ACI, 1997.

[8] F. Weisbe; J. Von Werder; T. Manninger; B. Maier; M. Fladt; S. Simon; A. Gardei; D. Hoehnel; S. Pirskawetz; B. Meng, “A multiscale and multimethod approach to assess and mitigate concrete damage due to alkali-silica reaction”, Advanced Engineering Materials, 2022.

[9] ASTM, “Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method), Standard ASTM C-1260.

[10] E. Caballero, “Evaluación de materiales para dictaminar la existencia de compuestos que puedan generar una reacción álcali-sílice en pavimentos de concreto”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México, 1999.

[11] J. Almaral, “Caracterización química y física de agregados considerados en el diseño de concreto hidráulico para pavimentos rígidos”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México, 1999.

[12] ASTM, “Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size”, Standard ASTM C-702.

[13] ASTM, “Standard practice for use of apparatus for the determination length change of hardened cement paste, mortar and concrete”, Standard ASTM C-490.

[14] ASTM, “Standard practice for mechanical mixing hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency”, Standard ASTM C-305.

[15] ASTM, “Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (cube specimens)”, Standard ASTM 109/C109M.