ALKALI-AGGREGATE REACTION EFFECT

by

Juan Luis Cottier Caviedes

Synopsis: In this paper it is intended to show the Alkali-Aggregate Reaction State-of-th Art which is a very important aspect in concrete structures durability. Now a days, th subject is becoming more and more important due to the increase of building structur affected by this reaction, as well as more aggregates are being identified as potentia reactive.

Mechanisms of reaction are explained in a general way, as well as factors whic influence its development; for example, alkalis present in concrete, and potentially reacti aggregates, etc. Main effects of this reaction in concrete are mentioned, as cracking, lo strength which affects structures safety and durability.

Keywords: alkali-aggregate reaction, aggregate, cement, expansion, damage, deleterious alkalinity, elasticity modulus, reinforce, structure.

EFECTOS DE LA REACCIÓN ALCALI-AGREGADO EN EL CONCRETO

por

Juan Luis Cottier Caviedes

Sinópsis: Se intenta mediante el presente trabajo, mostrar el estado actual del conocimiento acerca de la reacción álcali-agregado, que constituye un aspecto muy particular de la durabilidad de las obras de concreto. El tema cobra interés día a día ya que van en aumento las obras identificadas como afectadas por la reacción, así como también se han identificado más agregados como potencialmente reactivos.

Se exponen en forma general los mecanismos de desarrollo de la reacción, los factores que influyen su creación como son: la presencia de álcalis en el concreto y los agregados potencialemnte reactivos, entre otros. Se expone de igual forma cuales son los principales efectos que la reacción causa en al concreto, como son: agrietamiento y disminución de la resistencia, lo que afecta a las estructuras en su seguridad y durabilidad.

Palabras clave: Reacción álcali-agregado, agregado, cemento, concreto, expansión, deterioro, deletéreo, alcalinidad, resistencia, módulo de elasticidad, refuerzo, estructura.

Juan Luis Cottier Caviedes. Ingeniero Civil egresado de la Facultad de Ingreniería de l Universidad Nacional Autónoma de México. Estudios de posgrado en la Ecole Nationale de Ponts et Chaussés en París, Francia y en el Instituto de la Construcción y del Cemen "Eduardo Torroja" en Madrid, España. Ha sido jefe del laboratorio de materiales de l Facultad de Ingeniería de la UNAM y ha dirigido proyectos de diseño y reparación de obra en la iniciativa privada. Actualmente es gerente del departamento de Asesorías Técnica del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

LA REACCION ALCALI AGREGADO EN EL CONCRETO

Antecedentes

El concreto ha sido -desde su descubrimiento- reconocido como un material d construcción durable, entendiendo como durabilidad la capacidad de resistencia d material, a lo largo del tiempo, en relación con las condiciones del medio ambiente a como también con las condiciones de servicio de las estructuras.

Material compuesto de la mezcla de cemento, agua y agregados, los cuales reaccionar y endurecer forman una piedra artificial, con un comportamiento que se acep como homogéneo.

Las características propias del concreto como son: resistencia, manejabilidad, form de producción, facilidad de tomar la forma del molde donde se deposita, durabilidad, etc le han permitido ser el material de construcción más usado a través del tiempo.

En los inicios del siglo XIX se aceptaba la hipótesis de que los agregados (arena grava) eran cuerpos inertes cuya función era principalmente como relleno sin activida alguna, además se aceptaban solo dos agentes que causaban daños al concreto: congelamiento y el agua de mar, haciendo a un lado cualquier otro tipo de reacciones qu se relacionaran con la pasta y los agregados las cuales, por lo general, tienen efecto perjudiciales que normalmente dan origen a expansiones nocivas para la integridad d concreto.

Durante los años 20's y 30's en el estado de California, en Estados Unidos, s observaron una serie de agrietamientos en estructuras que cumplían ampliamente con la especificaciones marcadas en los códigos de diseño, construcción y calidad de lo materiales; motivados por encontrar una respuesta real al fenómeno de agrietamiento, u amplio grupo de técnicos se dieron a la tarea de estudiar el comportamiento inexplicabl

En el año de 1940 el investigador Thomas Stanton pudo demostrar la existencia de la reacción llamada álcali-agregado, como un proceso intrínseco de degradación del concreto, dejando en claro que las condiciones del medio ambiente en que se encuentran las estructuras son tan importantes como lo es el cemento y los agregados, reafirmando el verdadero papel que los agregados desempeñan como componentes activos, utilizados en la dosificación del concreto.

Estudios posteriores a los realizados por Thomas Stanton demostraron que éstos agrietamientos y expansiones en el concreto tenían su origen en una combinación de cemento con alto contenido de álcalis y agregados opalinos usados en su dosificación.

Durante las décadas siguientes este fenómeno se ha estudiado en diferentes laboratorios y en diversos países tales como Australia, Canadá, Francia, Nueva Zelanda, China, Sudáfrica, etc.; investigaciones que han experimentado un rápido progreso en distintas direcciones, logrando identificar los diferentes tipos de agregados que son susceptibles a intervenir en dicha reacción, mecanismos de desarrollo y métodos de diagnóstico. Muchos han sido los aportes al tema, sin embargo se pueden identificar cuatro como de particular importancia: Thomas Stanton de Estados Unidos quien explicó por primera vez el fenómeno de la reacción, Swensoon de Canadá, quién identificó la reacción Alcali-Carbonato, Idarm de Dinamarca quién por primera vez investigó un concreto dañado con la reacción álcali-agregado en Europa y Vivian de Australia quien explicó los mecanismos de la reacción.

Las investigaciones de T. Stanton marcaron el camino para innumerables investigaciones en el área de la reacción álcali-agregado que han enfocado sus objetivos, primordialmente, en métodos que permitan seleccionar el agregado a utilizar para evitar la reacción, dejando en un plano secundario la identificación del fenómeno en el concreto endurecido, sistemas de monitoreo del desarrollo de la reacción, así como métodos y materiales de reparación de estructuras afectadas por la reacción.

Principios de la Reacción Alcali-Agregado

La reacción álcali-agregado se identifica como un proceso físicoquímico en el cual intervienen principalmente los minerales que constituyen la roca utilizada como agregado, según sea su naturaleza cristalina o amorfa y los hidróxidos alcalinos del concreto que pueden ser aportados, bien por el cemento, por los mismos agregados o por algún agente externo.

Gran parte de los agregados utilizados en la dosificación del concreto con cemento portland son químicamente estables y sin interacción deletérea con otros ingredientes del concreto, sin embargo este no es el caso de los que contienen ciertos minerales que reaccionan con los álcalis solubles en el concreto.

Esta reacción que se genera es denominada en forma general como álcali-agregado identificándose tres diferentes tipos de reacción como son:

- Alcali-carbonato
- Alcali-silicato
- Alcali-sílice

Varios tipos de interacciones pueden ocurrir en cada clase y no todas son necesariamente expansivas o deletéreas.

De las reacciones presentadas, la primera se considera diferente de las otras pues se lleva a cabo entre los álcalis aportados por el cemento en la fase líquida del concreto y las rocas carbonato; este es un caso poco frecuente. Se identifica como un proceso químico de dedolomitización esto es una descomposición de la dolomita ($CaMgCO_3$) en presencia del hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ propiciando la formación de calcita $CaCO_3$ y de brucita $Mg(OH)_2$, minerales estables e insolubles.

En la realidad se conoce poco de este tipo de reacción por lo poco frecuente que se presenta. Existe un solo tipo que se produce en presencia de agregado fino o arena dolomítica, la cual contiene calcita y arcilla intersticial y produce expansiones significativas.

Las reacciones álcali-silicato ocurren en concretos ricos en álcalis los cuales contienen argilita y rocas del tipo grauvaca en el agregado. La reacción de este género de rocas y los álcalis es por lo general lenta y no está completamente comprendida. Los constituyentes silíceos en los agregados pueden expandirse causando la ruptura del concreto. Por la expansión de partículas individuales, se sugiere la absorción de agua sobre la superficie alúmino-silicosas previamente secas localizadas en las porciones microcristalinas de las mismas. Se deduce que puede existir una relación directa entre la cantidad de material microcristalino, la porosidad y la expansión del concreto que contiene estos agregados.

La reacción más frecuente donde intervienen los hidróxidos álcali y el material silíceo de los agregados del concreto es identificada como álcali-sílice, fenómeno que es particularmente expansivo ya que tiene la capacidad de desarrollar suficiente presión de dilatación para fisurar y romper el concreto. Generalmente la reacción progresa lentamente permitiendo que las expansiones sean previstas algunos años antes de que el daño de la estructura sea de gravedad.

Esta reacción tiene la particularidad de producir un gel álcali-silicoso el cual es higroscópico y es el resultado de la interacción de los álcalis solubles en el cemento y los elementos integrantes de las partículas de agregados, que por su característica de ser hidrofílico absorbe humedad, incrementando su volumen. De esta manera, generan presiones suficientes para fracturar la estructura del concreto.

De acuerdo a diferentes investigadores, la reacción se considera que progresa en función de las siguientes ecuaciones idealizadas:

$$4SiO_2 + 2NaOH = Na_2Si_4O_9 + H_2O$$
$$SiO_2 + 2NaOH = Na_2SiO_3 + H_2O$$

En términos generales, la reacción puede ser en dos etapas. La primera es la hidrólisis de la sílice reactiva por OH- formando un gel, y en una segunda fase comienza la absorción de agua por lo cual el gel aumentará de volumen induciendo a la generación de presiones que formarán microgrietas cercanas a los lugares de la reacción, permitiendo su propagación y aglutinamiento, provocando así, agrietamientos dentro de la estructura del concreto y expansiones generalizadas del elemento afectado, como se observa en la foto 1.

Se observa que al aparecer las primeras grietas, estas permiten el acceso de agentes degradantes al interior del concreto, ocasionando que aparezcan otros mecanismos destructivos. El fenómeno de corrosión del acero de refuerzo, no se desarrolla en forma convencional, debido al pH del gel que es altamente alcalino. El fenómeno de lixiviación del carbonato de calcio es común. El carbonato de calcio se deposita sobre las superficies externas del concreto, y deja insterticios mayores en el interior del mismo. Se ha encontrado etringita en las grietas, mismas en las que se ha observado el gel álcali-silicoso, observándose las variedades de etringita cristalina y amorfa, así como desarrollos normales de portlandita en la matriz cementante.

Es importante hacer notar, que en la mayoría de los casos, la etringita encontrada es la que normalmente se forma entre el aluminato tricálcico y el sulfato de calcio en la hidratación del cemento, lo que sugiere que ninguna fuente externa de ataque de sulfatos ha causado el desarrollo de la etringita, sino que por el contrario el sulfato necesario se deriva de la matriz cementante.

El remplazo de gel por etringita también sugiere que la reacción avanza antes de la formación total de la misma, la cual se estima que se desarrolla de manera principal en el gel, cuya composición es muy variable como se puede observar en la tabla 1.

El transporte de iones sulfato conjuntamente con el agua para la hidratación del gel álcali-sílice, quizá sea el mecanismo por medio del cual los cristales de etringita se desarrollen y crezcan. Su crecimiento en microgrietas y poros en la pasta de cemento pueden ejercer suficiente presión dentro de la estructura del concreto para contribuir a las expansiones observadas en elementos estructurales.

Necesidades de Alcalis en la Reacción Alcali-Sílice

En forma generalizada las estructuras de concreto que se han identificado como dañadas por la reacción fueron construidas con un concreto con cemento portland ordinario, el cual normalmente contiene una pequeña proporción de sodio (Na) y potasio (K) presentes como

sulfatos y sulfatos dobles (Na, K)SO_4, los cuales tienden a cubrir a otros minerales d clínker y también como constituyentes menores en los otros minerales del cemento.

Al parecer los álcalis tienen su origen en la materia prima utilizada en la fabricación d cemento, usualmente la fracción arcillosa y el carbón (si éste es utilizado co combustible del horno). Si el material arcilloso utilizado como materia prima contiene m o arcilla ilítica, entonces el clíncker producido estará enriquecido en potasio, mientras q si está presente el feldespato degradado, el clincker puede contener más sodio o potas o ambos, dependiendo de la composición del feldespato en la materia prima.

Las cantidades finales de los álcalis presentes en un clincker dependerán de proporciones de mica, ilita o feldespato en la alimentación del horno.

Las fases álcali tienden a ser una fracción volátil en el ambiente del horno. Alrede de un % se volatiliza durante el proceso de quemado. Una gran cantidad del álcali redepositado en la cadena de sección del horno y en los precalentadores, precipitado de polvo y filtros. A fin de reducir los consumos de combustible y emitir gases m limpios, la recirculación de polvos es práctica común en las plantas modernas pero es procedimiento tiene un efecto adverso en la composición del clincker del cemento.

Con el objeto de contabilizar la cantidad de álcalis presentes en el cemento o concre se ha generalizado la práctica de expresar el contenido de álcalis en términos de so equivalente, correlacionando los óxidos de sodio y potasio en términos de proporcion moleculares. El cálculo a seguir es bajo la relación matemática siguiente:

Sodio equivalente = Na_2O + 0.653 K_2O relación en peso.

Cuando el valor del sodio equivalente se encuentra por debajo de 0.6% en peso, reacción álcali-sílice no puede llevarse a cabo; este valor es recomendado por much autores como máximo permitido a fin de minimizar el riesgo de daño. Del mismo modo, masa de álcalis provenientes de otras fuentes no debe ser mayor de 3 Kg/m3 en concreto. Es importante señalar que en estructuras donde se ha identificado la reacció estos valores han sido encontrados en niveles menores. Esto puede ser quizá por resultado de álcalis que han sido lixiviados de la estructura con el tiempo.

Una vez iniciada la reacción, es capaz de generar suficiente energía libre, que le perm continuar a pesar de los bajos niveles de álcalis, o concentraciones altas de álcalis m localizadas dentro del concreto, siendo capaces de mantener la reacción en esos sitio

Se tienen evidencias en base a microscopía electrónica de que, a pesar de que exist bajos niveles de álcali en la pasta de cemento, las partículas reactivas de agregado en mismo concreto pueden inducir niveles altos de reacción dentro del concreto, en conjunto.

Componente Sílice-Reactivo en el Concreto.

Para que la reacción se lleve a cabo, es necesaria la presencia de una determinada forma de "sílice reactivo". El volumen para producir efectos deletéreos necesita ser solo muy pequeño. En estructuras donde se han observado daños calificados como severos, se han reportado componentes reactivos del 2%. Existen varios tipos de rocas que son utilizados en la fabricación del concreto y solo rocas puras tales como las calizas, se pueden excluir de la posibilidad de contener una pequeña proporción de una forma de sílice reactiva, ya sea como constituyente original, primario o secundario.

El considerar únicamente el tipo de roca como criterio para evaluar su potencial de reactividad, nos lleva a situaciones erróneas, por lo cual diversos autores han puesto especial atención en los constituyentes minerales de la roca misma.

Aunque por lo general, la mayor parte de las rocas son capaces de contener formas reactivas de sílice, el número de tipos de sílice que exhiben reactividad es pequeño.

Probablemente los requisitos dominantes para que un material sea reactivo son, entre otros, que deberá ser una forma de sílice que es pobremente cristalina o contiene muchos defectos de arreglo, o alternativamente debe ser amorfa o vítrea en carácter. Un ejemplo de los minerales naturales que cumplen estos criterios se presenta en la tabla 2.

Algunos granitos, gneises graníticos, hornblendas y grauvacas, se ha encontrado que son reactivos cuando se utilizan en el concreto. Se ha notado que, aunque el mineral reactivo preciso constituyente dentro de estas rocas no puede ser identificado, los granos de cristal de cuarzo que ellas contienen muestra que son amorfos cuando son examinadas utilizando un microscopio polarizado. Una observación ulterior (ref. 6) mostró que la reactividad puede ser correlacionada en forma general con la severidad del esfuerzo.

Además de las características de la sílice reactiva, existen otros factores que influyen en la forma como se desarrolla la reacción y la intensidad de sus efectos.

Entre los factores más importantes se encuentran la temperatura, la humedad y la granulometría de los agregados.

La temperatura es un factor que incrementa la velocidad con que se produce la reacción e interviene en las dos etapas del desarrollo de la reacción: creación del gel y proceso de expansión.

Existe una prueba la cual permite demostrar la influencia de la temperatura en la primera etapa. Esta prueba es identificada como "trozo de gel" y fue desarrollada por Jones y Tarleton (ref. 2), en la cual las partículas de agregado reactivo están expuestas a soluciones concentradas de álcali sobre la superficie de una tableta de cemento, a temperatura ambiente. Los materiales altamente reactivos, tales como el ópalo, desarrollan gel sobre sus superficies, dentro de unos pocos días de almacenados. Si la temperatura de almacenamiento alcanza unos °C, el desarrollo de gel sobre la superficie de tales