



# Metodología para la determinación de la reacción álcali-sílice (RAS)

Abraham López Miguel José Trinidad Pérez Quiroz Jorge Terán Guillén Maura Arroyo Olvera

Publicación Técnica No. 727 **Querétaro, México 2023** 

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Abraham López Miguel, Dr. Jose Trinidad Pérez Quiroz, Dr. Jorge Terán Guillen y la Ing. Maura Arroyo Olvera. Investigadores del Instituto Mexicano del transporte adscritos a la especialidad de materiales alternativos

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna El 13/22 "Desarrollo de la metodología para la determinación de la reacción álcali-sílice en muestras de concreto".

Se agradecen los comentarios y observaciones a este trabajo realizadas por el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Jefe de División de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

#### **Tabla de Contenido**

				Página
S	inops	sis		V
Δ	bstra	ct		vii
۱r	ntrod	ucci	ón	1
1.	As	pect	tos generales de la RAS	3
	1.1	Ori	gen y antecedentes de la Reacción Álcali-Sílice	5
	1.2	Rea	acción álcali-Sílice en México	8
	1.3	Tip	os de reacción álcali-sílice	9
	1.3. 1.3. 1.4	.2	Patrón de reacción de agregados de reacción rápida Patrón de reacción de agregados de reacción lenta ctores que influyen en la reacción Álcali-Sílice	10
	1.4 1.4 1.4 1.4	.2	Temperatura  Humedad  Contenido de álcalis  Porosidad del agregado	11 12
2	. Té	cnic	as de caracterización/Identificación de la RAS	
	2.1 agre		TM C 295 Guía estándar para el examen petrográfos para concreto	
	2.2 sílice		TM C 289 Método de ensayo para la reactividad potencia los agregados (método químico)	
	2.3	AS	TM C 1260 Método acelerado de barras de mortero	17
	cam	bio	TM C 1293 Método de prueba estándar para determ de longitud del concreto debido a la reacción álcali-si de concreto	ílice en

2.5	AASHTO TP 110 Prueba del prisma de concreto en miniatura21
3. M	etodología de caracterización de la RAS25
3.1 295)	Diagrama para caracterizar agregados por petrografía (ASTM C 26
	Diagrama para caracterizar agregados por el método acelerado de as de mortero (ASTM C 1260)28
	Diagrama para caracterizar agregados por el método de prismas oncreto (ASTM C 1293)32
	Diagrama para caracterizar el concreto por el método ochemical Methods for the identification of RAS gel"35
	Diagrama para caracterizar muestras de concreto por petrografía M C856)38
Concl	usiones45
Biblio	grafía47

#### **Sinopsis**

En el presente trabajo se resume información sobre la reacción álcali-sílice en el concreto, una breve reseña de sus antecedentes (¿Qué es una reacción álcali-sílice (RAS)?, el pionero en reportar esta reacción), tipos de reacción, los mecanismos de reacción, los factores que favorecen esta reacción y los métodos de ensayo actualmente empleados para su caracterización.

Posterior a la información recaba, se presenta un diagrama de proceso, en donde se presenta una propuesta metodológica para la caracterización de la RAS en el concreto ya que, la selección de la metodología, está en función del material a caracterizar, sea agregado o una muestra de concreto.



#### **Abstract**

This paper summarizes information on the alkali-silica reaction in concrete, a brief review of its background (What is an alkali-silica reaction (ASR), the pioneer in reporting this reaction), reaction types, reaction mechanisms, factors favoring this reaction and test methods currently used for its characterization.

After the information collected, we propose a process diagram for the RAS characterization methodology in concrete. The selection of the methodology depends on the material to be characterized, i.e., it can be aggregate or a concrete sample a concrete sample.



#### Introducción

Uno de los problemas que más impacta en la durabilidad de las estructuras de concreto es la corrosión del acero, uno de los componentes principales en las estructuras, sin embargo, el concreto también es afectado por la presencia de agentes en el material de fabricación (iones cloruros en el agregado fino, iones alcalinos en los agregados, etc.) de la estructura. En México se ha puesto especial atención a la corrosión del acero, sin embargo, es de igual importancia el concreto, por lo que debe considerarse su evaluación y caracterización para complementar el análisis por durabilidad de una estructura.

La RAS produce daño en las estructuras de concreto cuando se cumplen simultáneamente condiciones del grupo de materiales constituyentes, del medio ambiente y del tipo de estructura. Las condiciones citadas, hacen referencia a la definición de la RAS, pues deben existir agregados reactivos, presencia de iones alcalinos (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup>) en la solución poro aportados principalmente por el cemento, humedad elevada en forma periódica o permanente que dependerá de la ubicación de la estructura y del medio ambiente; y por último la temperatura es un factor que puede acelerar el proceso de deterioro (Irassar Edgardo 2001).

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica de antecedentes de la reacción álcali-sílice y se describen las metodologías de caracterización del agregado y del concreto.

En el capítulo 3 se presenta una propuesta metodológica para realizar la caracterización de la reacción álcali sílice (RAS) en laboratorio, tanto para el agregado como para el concreto, para ser implementado en la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes como un procedimiento de control de calidad que mida la durabilidad de las estructuras de concreto armado.



#### 1. Aspectos generales de la RAS

El concreto reforzado, es uno de los materiales de construcción ampliamente empleados en obras de alto impacto en la Secretaría y en obras en general. Sus propiedades físicas y químicas lo posicionan como el material idóneo, debido a que conserva sus propiedades por un periodo prolongado de tiempo "vida útil". La durabilidad en estas estructuras es un factor que se debe considerar durante el diseño de las mismas, esto para hacer que el "tiempo de vida útil" de la estructura sea mayor.

Durabilidad es la capacidad que poseen los materiales, que componen una estructura, para perdurar en el tiempo, manteniendo sus características físico-mecánicas iniciales. En el caso del concreto, la principal causa de su deterioro está vinculada a la acción del medio ambiente que lo rodea (suelos, agua, temperatura, humedad relativa, iones agresivos, etc).

En la figura 1.1 se presenta el modelo que esquematiza todos los procesos de degradación del concreto, el cual incluye dos períodos: período de iniciación (Pi) que es el tiempo que tardan las sustancias agresivas y las reactivas en ponerse en contacto y el período de propagación (Pp) que es el tiempo durante el cual se producen las reacciones cuyos resultados pueden llegar a un grado de deterioro inaceptable para la seguridad, funcionalidad o estética de la estructura. Este modelo fue propuesto por Tutti para la corrosión de las armaduras.

En el caso de la RAS, el período de iniciación es el tiempo durante el cual los iones (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, OH<sup>-</sup>) en la solución de poros migran o difunden hacia al agregado reactivo y se forman los primeros productos de reacción, denominado como el período de inducción de la RAS (Edgardo, 2001). El período de propagación es el tiempo donde el hinchamiento del gel genera tensiones que superan la resistencia a tensión del concreto provocando las primeras fisuras (no visibles a simple vista) y/o la aparición de geles sobre la superficie de la estructura. De esta manera se llega a la vida útil en servicio que solo requiere una mínima reparación para mejorar el aspecto estético de la estructura. El aumento de las fisuras, en tamaño (ancho y longitud) y cantidad (densidad), afecta la funcionalidad de la estructura requiriendo una mayor intervención para que la misma continúe en servicio; y por último el crecimiento de tamaño y la unificación

de fisuras provocan una disminución de la capacidad portante que pueden producir el colapso de la estructura, poniendo en riesgo la vida de los usuarios, seguridad, y de esta manera se llega al final de la vida útil.

En este modelo de deterioro por RAS, cuando las estructuras de concreto no están sometidas a un nivel adecuado de humedad presenta un período de iniciación indefinido.

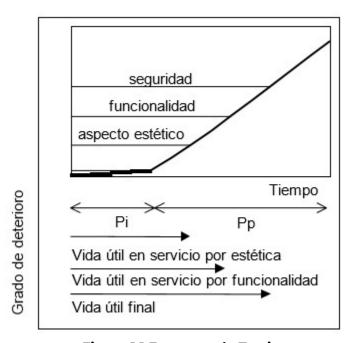


Figura 1.1 Esquema de Tutti

El Reglamento CIRSOC-201 (2005) hace referencia al concepto de vida útil en servicio de una estructura como "El período a partir de la construcción, durante el cual deben mantenerse las condiciones de seguridad, funcionalidad y aspectos aceptables sin gastos de mantenimiento significativos"; considerando expresamente que las especificaciones de durabilidad indicadas en el mismo, permiten obtener una vida en servicio de la estructura de 50 años (CIRSOC, 201-2005).

Entre las principales patologías del concreto reportadas se encuentran: ataques físicos (erosión, etc.), químicos (sulfatos, reacción álcali agregado, etc) y del acero (corrosión, etc).

#### 1.1 Origen y antecedentes de la Reacción Álcali-Sílice

En concretos de cemento portland, cuando los álcalis del cemento reaccionan con la sílice de los agregados se produce un gel que en presencia de humedad se expande causando un agrietamiento en forma de piel de cocodrilo (Ver. Figura 1.2), a esto se le llama reacción álcali-sílice (Reacción 1).

Entre los años 1920 y 1930 en los Estados Unidos de América se detectó y reporto por Thomas Stanton los primeros antecedentes relacionados a estructuras dañadas por la RAS (Stanton T.E, 1942) En la planta hidroeléctrica Buck, construida en 1912 en Virginia, se detectaron las primeras evidencias de la RAS, observado principalmente expansión y fisurado, en 1922. Los resultados de ensayos realizados con los mismos agregados utilizados en la construcción de la planta en la que se empleó un cemento de elevado contenido de álcalis mostraron grandes expansiones luego de un año a 43 °C (Kammer 1941), esto fue atribuido a la influencia del álcali presente en el cemento, el tipo y cantidad de sílice reactiva en los agregados y la disponibilidad de humedad y temperatura (Fanijo, Kolawole and Almakrab, 2021) . En 1932, la presa Owyhee en Oregón se construyó con un agregado natural caracterizado como muy reactivo con el método de la barra de mortero (ASTM C 1260) y solamente se manifestaron evidencias de RAS, fisurado, en 2 ó 3 áreas en 1937, sin embargo, este deterioro progresó hasta los seis años (en 1943) (Blanks, 1945). La presa Parker, sobre el río Colorado, construida en 1938 a los dos años aparecieron fisuras características de la RAS de igual manera fue diagnosticado por Stanton (Meissner, 1941) En Argentina, a mediados de la década de 1950, la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires solicitó al LEMIT, con posterioridad a la construcción, evaluar el deterioro progresivo del camino de concreto a Punta Lara; estudios realizados a los agregados y al cemento confirmaron que era posible la existencia de RAS en el concreto (Fava, 1961).

Stanton determino que el contenido de alcalinos en el cemento era el principal causante del daño por expansión en las estructuras de concreto y que el constituyente reactivo era la sílice en forma de ópalo presente en el agregado. Según Stanton, para evitar el daño causado por la RAS, la cantidad de alcalinos en el cemento, expresados como Na<sub>2</sub>Oeq debía ser menor del 0.6%.

El trabajo de Stanton impulso que investigadores de diferentes laboratorios investigaran e interpretaran deterioros similares en estructuras de concreto, es así, como se detectó en diversas obras dañadas por esta reacción, primero en EE.UU. y más tarde en Europa, Canadá y otras partes del mundo (Poole, 1992)

La reacción álcali-árido (RAA) involucra reacciones químicas entre los hidróxidos alcalinos que provienen del cemento y los componentes reactivos de los agregados utilizados (HOBBS, D.W., 1988) y estos según su naturaleza se dividen en reacción álcali carbonato (RAC) y reacción álcali sílice (RAS).

Reacción álcali carbonato (RAC): Las rocas dolomíticas impuras presentes en el cemento y los agregados carbonáticos son los más nocivos para el concreto, debido a las expansiones que provoca al reaccionar. Estos agregados producen la dedolomitización con formación de brucita (Mg(OH)<sub>2</sub>) y la regeneración del hidróxido alcalino. La brucita al ser un componente casi insoluble, precipita de forma expansiva produciendo una debilidad/fragilidad en la interface agregado/cemento y una zona porosa alrededor del agregado.

Reacción Álcalí-sílice (RAS): La alcalinidad de la solución intersticial de los poros del concreto ataca los minerales silíceos de los agregados rompiendo el puente siloxano de los mismos. Iniciando así la formación de un gel de color blanquecino causante, a través de procesos físico-químicos, de la degradación del concreto.

La reacción álcali-sílice, es de aparición más frecuente que la reacción álcali-carbonato, por lo que en este trabajo se enfoca en esta reacción.

Durante el proceso de hidratación del cemento, se forman compuestos alcalinos que contiene hidróxido sódico, hidróxido cálcico e hidróxido potásico, por lo que se puede definir como una solución con iones de Na<sup>+</sup>, k<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y OH<sup>-</sup>, la cantidad de estos iones dependen de la cantidad de alcalinos presentes en el cemento, como es bien conocido, el pH del concreto oscila entre 12.5 y 13.9. Con esta alta alcalinidad en el medio, es difícil que rocas ácidas en las que en su composición se encuentra el cuarzo, no sean estables con el tiempo, por lo que tenderán a adaptarse al nuevo equilibrio (disolverse) y liberar sílice al medio (ACI Committe 221, 1998).

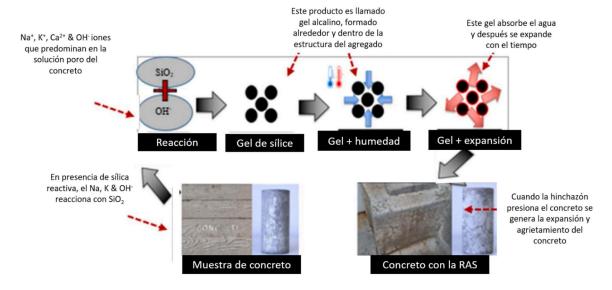
El gel formado por esta reacción genera un incremento en la presión interna en regiones localizadas del concreto, como consecuencia de esto se genera un incremento de presión e induce a deformaciones, expansión excesiva de la estructura, provocando la disminución de la vida de servicio (Cecilia Olague Caballero, 2011). Para que ocurran las RAS es necesaria la presencia en simultáneo de suficiente humedad, álcalis y agregados reactivos. En algunos agregados, los componentes de sílice activa la reacción con los álcalis de los materiales cementantes, produciéndose el

gel de sílice alcalina. Este producto (gel) es higroscópico con alta capacidad de absorber agua. El mecanismo de esta reacción es reportado por (Fanijo 2021) y representado en la Figura 1.2.



Fuente: Thomas 2013)

Figura 1.2 Patrón de agrietamiento característico de la reacción álcali-sílice en "forma" de piel de cocodrilo, reportado por primera vez por Thomas Sthanton



Fuente: Fanijo 2021

Figura 1.3 Mecanismo de la RAS en estructuras de concreto

La fuente principal del suministro de los álcalis es el cemento, también, cualquier fuente de sodio o potasio puede ser una contribución

importante para favorecer la reacción, incluyendo los álcalis de los agregados (Santos, De Brito and Santos Silva, 2009).

$$SiO_2 + 2NaOH + nH2O \rightarrow Na_2SiO_3 * nH_2O$$
 Reacción 1

La reacción puede continuar al reaccionar el gel alcalino con el hidróxido cálcico procedente de la hidratación del cemento, produciéndose un intercambio iónico en el que se liberan nuevamente más alcalinos y estos pueden intervenir nuevamente en más reacciones (reacción 2).

$$Na_2SiO_3*nH_2O + Ca(OH)2 + H_2O \rightarrow CaSiO_3*mH_2O + 2NaOH$$
 Reacción 2

En esa transición entre el gel alcalino y el calcio, lo que realmente se encuentra en el concreto es un gel silico-calco-alcalino (Alberto, 2014). La reacción álcali-sílice se ha dividido en dos grupos dependiendo el tipo de agregado presente en el concreto. La clasificación se basa en la evolución de la velocidad de reacción, presentándose así, una reacción rápida y una reacción lenta (Ponce and Batic, 2005).

Un primer grupo de rocas es el compuesto por aquellas que contienen especies amorfas, porosas o minerales hidratados como ópalo (SiO<sub>2</sub>nH<sub>2</sub>O), que son extremadamente reactivos en determinadas condiciones. Estas rocas reaccionan rápidamente, observándose la reacción en periodos cortos de tiempo (desde l año). El otro grupo lo forman rocas silíceas bien cristalizadas y más densas que bajo cambios térmicos, pueden presentar cuarzos deformados o micro fisuras que muestran ciertos niveles de reactividad mediante un mecanismo lento (puede manifestarse incluso después de 20 años) que produce una reacción lenta con efectos expansivos y un deterioro tardío (Alberto, 2014).

En cementos Portland, el óxido de sodio equivalente ( $Na_2O_{eq} = Na_2O + 0.658x K_2O$ ) es utilizado, por convención, para indicar el contenido en álcalis, siendo limitado a valores inferiores al 0.6%; sin embargo, algunos autores recomiendan limites inferiores. Las recomendaciones por norma más actuales establecen que el control del contenido de  $Na_2Oeq$  del concreto sea igual a la suma del contenido de  $Na_2Oeq$  de sus constituyentes.

#### 1.2 Reacción álcali-sílice en México

Olague y otros en 2002 (Olague, Castro and López, 2002) realizaron un estudio de caracterización de 22 bancos de gravas y 22 de arenas, lo que representa un 92% de la población total del Estado de Chihuahua. El contenido total de álcalis de los cementos fue obtenido a partir de fluorescencia de rayos X. En donde el contenido total de álcalis en

unidades de Na2O equivalente, como el porcentaje de Na2O más 0.658 veces el porcentaje de K<sub>2</sub>O, asumiendo que la concentración equivalente de KOH y NaOH son iguales en sus efectos. Posterior a la caracterización realizaron una segunda prueba fabricando barras de mortero con vidrio pyrex de cuarzo, esta prueba es muy similar a la prueba de expansión de barras de mortero, con la diferencia de que en esta prueba las muestras se introducen en una autoclave durante 5 horas a 125°C, después se deja enfriar a temperatura ambiente. De acuerdo a la ASTM C 1260, la RAS es no deletérea si la expansión es menor de 0.1%. Poole, Alan B., (1992).

En la zona norte de México, en el año 2022, la secretaria detecto obras con indicios y casos confirmados de la presencia de esta reacción. Parte de las muestras de concreto fueron analizadas en la coordinación de ingeniería vehicular e Integridad Estructural. Los resultados se presentan en el apartado 3.5. La caracterización se realizó de acuerdo al procedimiento indicado en la ASTM C457 y en el "Geochemical Methods for the Identification of ASR Gel". La caracterización por petrografía se realizó de acuerdo a lo recomendado por la ASTM C 856. La información obtenida confirmo la sospecha.

#### 1.3 Tipos de reacción álcali-sílice

Los componentes reactivos que presente el agregado, condicionara el tipo de reacción álcali-sílice que se origine. Los tipos de reacción álcali-sílice se dividen en función de la velocidad de evolución de la reacción, siendo asi: una reacción rápida y una reacción lenta (Ponce, J.M. y Batic, Oscar R., 2006).

En el primer caso, están involucradas las rocas que contienen especies amorfas, especies porosas o minerales hidratados como el ópalo, que son extremadamente reactivos en determinadas condiciones (Ponce, J.M. y Batic, Oscar R., (2006). La reacción de estas rocas es en periodos de tiempo cortos (1 a varios años).

Las rocas que generan una reacción lenta, está formado rocas silíceas bien cristalizadas y más densas que, bajo deformación o cambios bruscos de temperatura, estos presentan cuarzos deformados y/o micro fisuras que muestran ciertos niveles de reactividad mediante un mecanismo lento con efectos expansivos y un deterioro tardío. Esta reacción puede ser apreciable incluso en periodos a partir de los 20 años.

El mecanismo de reacción es el mismo para ambos tipos de reacciones. El agregado es atacado por la solución porosa que contienen iones OH<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>. Como consecuencia se forma una reacción en forma de gel con sodio y potasio capaz de absorber agua por ósmosis y expandir. La presión

generada por la formación y crecimiento de este gel es la principal causa de expansión y figuración del concreto (Ponce, J.M. y Batic, Oscar R., (2006).

### 1.3.1 Patrón de reacción de agregados de reacción rápida

Los minerales altamente reactivos como el ópalo y calcedonia presentes en los agregados reactivos, forman puntos localizados de disolución en la interfaz del agregado-cemento. Esto genera un incremento de permeabilidad de disoluciones agresivas incrementando o acelerando aún más el proceso de la reacción.

Los agregados reactivos presentes en el concreto inician la reacción cuando la solución con alta concentración de alcalinos e iones OHproduce una zona de reacción en la interfaz entre el agregado y la pasta de reacción de la solución presente en los poros del concreto con el cemento silíceo presente en el agregado, como ópalo y calcedonia. Por consiguiente, esto genera una disolución elevada del cemento silíceo y la formación de una aureola de reacción alrededor de la partícula, con formación de gel. Esta disolución alcalina penetra en las zonas reactivas (cemento silíceo) del agregado dejando zonas de disolución y provocando un incremento de la porosidad del concreto. El gel que se forma en las zonas de reacción ejerce presión en el concreto provocando fisuras a través de las que se desplaza a otras zonas como poros, pasta de cemento, interfaces y zonas defectuosas de fabricación. Como consecuencia de estas reacciones, el cemento silíceo es disuelto parcialmente a totalmente, por consiguiente, la cohesión entre los granos de mineral y concreto se pierde. La pérdida de cohesión genera huecos o zonas de debilidad entre el agregado y el cemento. El daño de estas reacciones continúa hacia el interior del concreto mediante la formación del gel y su expansión generando fisuras al interior, apareciendo desde las zonas reactivas hasta la pasta de cemento al exterior.

### 1.3.2 Patrón de reacción de agregados de reacción lenta

Los patrones de reacción para este tipo de agregados dependen en gran medida de sus características microestructurales, en donde el cuarzo deformado y/o micro fisurado juegan un papel fundamental en su reactividad. La reactividad en este tipo de agregados es principalmente mediante el acceso directo al agregado superficial (cuarzos susceptibles/disponibles a reacciona) y mediante el ataque o reacción puntual en áreas localizadas.

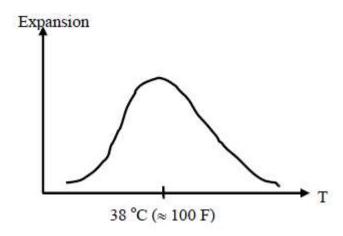
El otro patrón de reacción en este tipo de agregados, es por medio de los poros hasta las zonas reactivos, así las superficies presentan micro fisuras y diaclasas (en muchos casos son de origen natural). Las fisuras son corroídas originando zonas de disolución y formación de gel.

#### 1.4 Factores que influyen en la reacción Álcali-Sílice

La combinación de 4 factores principales para que se produzca la reacción álcali-sílice y genere daños en el concreto son:

#### 1.4.1 Temperatura

El efecto de la temperatura es usualmente relacionado con el incremento en la velocidad de reacción en los procesos químicos, por lo que en la reacción álcali-sílice es de esperarse dicho comportamiento. A menor temperatura, la reacción se produce más lenta (Poole, Alan B., (1992) y a mayor temperatura, la velocidad de la reacción es mayor y se observa la presencia de gel. El incremento en la temperatura favorece la disminución de la viscosidad del gel, por lo que le es más fácil penetrar y rellenar fisuras de menor tamaño. Para fines experimentales, la norma ASTM para prismas de concreta toma de referencia el valor de temperatura entre 38°C y 40°C (Ver Figura 1.4)



Fuente: Borge J y otros 2016

Figura 1.4 Relación de expansión del concreto vs temperatura con contenido de álcali y tiempo controlados

#### 1.4.2 Humedad

La humedad es el contenido de agua, y su influencia en las RAS está directamente relacionado con dos mecanismos: es imprescindible para el transporte de álcalis e iones hidroxilo y, al ser absorbida por los geles

higroscópicos, expandiendo el concreto e incrementando la presión en el interior hasta producir fisuras dentro del mismo (Poole, Alan B., (1992). La cantidad de agua estimada para que se produzca la reacción esta reportada entre un 65% y 80% (Alaejos Gutiérrez, Pilar y Bermúdez, Miguel A., (2003).

El avance de la reacción se puede afectar por el contenido de humedad, es decir, la reacción puede estar "detenida" por falta de agua, sin embargo, en cuanto el contenido de humedad sea suficiente la reacción se activará y por consiguiente la formación de nuevos geles (Multon, Stpephane y Toutlemonde, Francois (2010). Sin embargo, si el gel se seca completamente, se carbonata y se vuelve blanco, en este caso el gel es incapaz de expandirse de nuevo, aunque vuelva a tener disponible agua (Poole, Alan B., (1992).

#### 1.4.3 Contenido de álcalis

Existe una relación directa entre el porcentaje de sílice reactiva y el comportamiento expansivo del concreto, es decir, una cantidad excesiva de agregado reactivo puede suprimir la expansión del concreto. Esto por dos motivos:

- -falta de Ca(OH)<sub>2</sub> en la formación de halos de reacción. El incremento de la cantidad de agregado exige el incremento en el consumo de Ca(OH)<sub>2</sub> por el silicato maduro, por lo que la formación del halo se suprime.
- -falta de hidróxido alcalino para cada partícula de agregado reactivo.

#### 1.4.4 Porosidad del agregado

La porosidad del agregado desempeña un papel importante en la reacción álcali-sílice. Una mayor porosidad aumenta la susceptibilidad y velocidad de la RAS. Normalmente, los agregados y el concreto muy porosos permiten la entrada o fácil difusión de la RAS hacia el interior del concreto. (Ben Haha, 2007) y otros reportaron que los agregados con alta porosidad sufren más daño por expansión de la RAS que los agregados con menor porosidad, y concluyeron que los iones alcalinos se difunden fácilmente en los poros de los agregados más poroso, lo que inicia con la disolución de los agregados y por lo tanto la RAS.

## 2. Técnicas de caracterización/Identificación de la RAS

En el estudio de la reacción álcali-sílice no es posible asociar la reactividad del agregado a su geología, ya que la clasificación/registro total del tipo de roca reactiva no es completa, incluso el comportamiento de un tipo de agregado en una zona geográfica no es extrapolable a ese mismo tipo de roca en otro punto geográfico distinto. Por lo que existen diversos métodos de ensayo o técnicas que se realizan para la caracterización y evaluación de la reacción álcali-sílice. A continuación, se presenta un diagrama con los ensayos más importantes y una breve descripción de los más importantes.

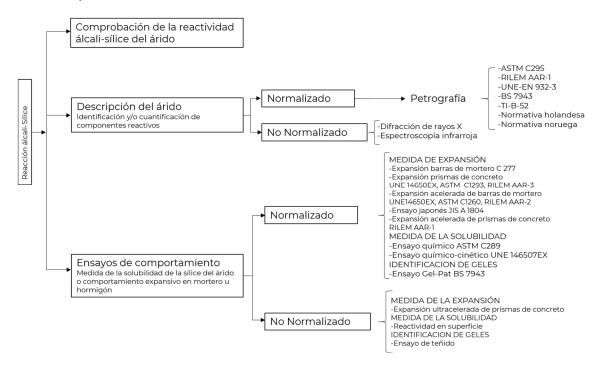


Figura 2.1 Métodos de ensayo para el estudio de la reacción álcali-sílice

La Figura 2.1 muestra los principales métodos de ensayo publicados para la evaluación de la RAS, sin embargo, algunos de los métodos como el ASTM C289 fue retirado en 2016, ASTM C856 y el ASTM C227 fueron retirados en 2018, esto porque surgieron nuevos métodos de ensayos mucho más fiables que estos métodos de prueba antiguos. Otros métodos

de ensayo aún activos para la evaluación de la susceptibilidad de los agregados o el concreto a la RAS incluyen la ASTM C 295 (examen petrográfico del agregado), ASTM C 1260 (ensayo acelerado de barras de concreto), ASTM C 1293 (ensayo de prismas de concreto) y el nuevo método AASHTO TP 110 (ensayo del prisma de concreta miniatura).

Comparando los distintos métodos existentes, estos tienden a simplificarse o han sufrido cambios en la metodología dependiendo las consideraciones de cada país. A continuación (Ver Figura 2.2), se presenta una tabla en resumen de evolución de las metodologías y la aceptación por cada país.

Estudio petrográfico		Ensayo de prismas de		Ensayo acelerado de probetas		
_		C	oncreto		ncreto	
Japón*	Dinamarca	Holanda	Nueva Zelanda**	Japón*	Holanda**	
Islandia*	Portuga	Noruega	Portugal**	Francia*	Italia**	
Dinamarca	Canada	Francia	Holanda	Noruega*	Islandia**	
Portugal	Francia	Reino Unio	: Noruega	Dinamarca	Portugal**	
Canada	Italia	Canada	Francia	Canáda	Dinamarca	
Francia	Holanda	EEUU	Reino Unido	EEUU	Canadá	
Italia	Nueva Zelanda		Canada	N. Zelanda	EEUU	
Holanda	Noruega		EEUU		Nueva Zelanda	
N. Zelanda	Reino Unido					
Noruega	EEEUU					
Reino Unido						
EEUU						
	Ensayo de pro	betas de	Ensayo q	uímico		
	morte	ro				
	Italia *	Francia**	Islandia*	Francia		
	Portugal *	Islandia	Italia*	Nueva Zelanda		
	Canada*	Nueva Zel	Holanda*	Japon		
	EEUU *	Japón	Portugal*			
	Islandia		Francia			
	N.Zelanda		N. Zelanda			
	Japón		Japón			
	1995 - 19		2004 -	2007		
	*Retiran el ensa	yo de su metodología				
	**Incorporan el	ensayo a s	u metodología			

Fuente: Víctor Daniel 2012

Figura 2.2 Resumen de evolución de las metodologías en los años más recientes

A continuación, se presentan detalles de algunos métodos más representativos:

## 2.1 ASTM C 295 Guía estándar para el examen petrográfico de agregados para concreto

Este método describe los procedimientos para el examen petrográfico de muestras representativas de materiales propuestos para uso como agregado en mezclas cementantes o como materias primas para su producción de dichos agregados.

Del mismo modo, se realiza un examen visual y microscópico de las muestras de agregados preparados utilizando un análisis granulométrico o un microscopio óptico (en el que se examina cuidadosamente la sección fina de los agregados). El examen se puede realizar mediante difracción de rayos x (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) o espectroscopia infrarroja (IR). Este método tiene la limitante que requiere un examinador petrográfico experto y hábil, y que el proceso consume mucho tiempo y energía para identificar la reactividad del agregado. El resultado de esta técnica depende de las conclusiones de otros métodos de ensayo, el método químico (ASTM C289) es común usarlo junto a esta técnica.

Esta norma describe los procedimientos para el examen petrográfico de muestras representativas de materiales propuestos para su uso como agregados en mezclas cementantes o como materias primas para su uso en la producción de dichos agregados.

Como primer paso, se debe cribar la muestra para obtener diferentes fracciones de acuerdo a la siguiente tabla:

Fracción	Cantidad			
granulométrica	Kilogramo	Partículas		
Mayor de 150 mm		Nunca menos de una partícula de cada tipo de roca clasificada por inspección visual		
75 – 150 mm		300 (Nunca menos de una partícula de cada tipo de roca clasificada por inspección visual)		
37.5 – 75 mm	180			
19.0 – 37.5 mm	90			
4.75 – 19.0 mm	45			
< 4.75	23			

Tabla 2.1 Características para selección de agregados acorde a la ASTM C 295

Para obtener resultados fiables, se deberán identificar y contar un mínimo de 150 partículas de cada fracción.

Una vez obtenidas las fracciones, se realiza una primera inspección visual en busca de capas superficiales en los agregados que puedan ser susceptibles de reaccionar (ópalo, materia orgánica.). Seguidamente se debe realizar una clasificación de los tipos de roca presentes por medio de un examen visual de la muestra. Si no pueden ser clasificadas visualmente, se procederá a emplear un estéreomicroscopio. Si sigue sin poderse clasificar los tipos de roca se empleará el microscópico petrográfico.

En el caso de estudiar arenas o agregado manufacturado se debe seguir el mismo procedimiento (separación por tamaños y posterior clasificación de los tipos de agregados separados de forma visual), si bien en el caso de la arena con algunas variaciones obligadas por la disminución del tamaño de partícula.

Para calcular la composición granulométrica de una muestra heterogénea y la composición media en peso de toda la muestra, se deben seguir los siguientes pasos:

- a) Expresar la composición granulométrica mediante la suma del número total de partículas contadas de cada fracción granulométrica, y calculando cada constituyente como porcentaje de la cantidad total de partículas de esa fracción granulométrica.
- b) Obtener el porcentaje en masa de partículas de esa fracción granulométrica en la muestra total.
- c) Multiplicando el porcentaje de cada constituyente en cada fracción granulométrica por el porcentaje de partículas de esa fracción granulométrica en la muestra total, se obtiene el porcentaje de ese constituyente y de esa fracción granulométrica en la muestra total. Sumando los porcentajes en peso de cada constituyente en cada fracción granulométrica, se obtienen los porcentajes en peso de cada constituyente en la muestra total.

El informe del examen petrográfico debe incluir los datos fundamentales de composición y propiedades del material revelados por el examen; también debe reflejar los métodos de ensayo empleados, y la naturaleza y características de cada constituyente importante de la muestra. Los constituyentes reactivos deben ser descritos cualitativamente y, en la medida de lo posible, cuantitativamente

## 2.2 ASTM C 289 Método de ensayo para la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados (método químico)

Este método de ensayo de basa en la reacción que se produce entre la disolución de 1 Normal de NaOH a una temperatura de 80°C durante un tiempo de exposición de 24 horas y un agregad (grueso o fino), previamente molido y tamizado y pasado el tamiz N° 50 y retenido en el tamiz N° 100. Posterior a este tiempo se enfría la muestra y se filtra de acuerdo con lo indicado en la norma. Se cuantifica la sílice disuelta y la reducción de la alcalinidad. Los agregados se considerarán reactivos cuando al representarlo en la Figura 2.3 (reducción de alcalinidad-concentración de sílice disuelta) caen sobre la línea o a la derecha de la misma.

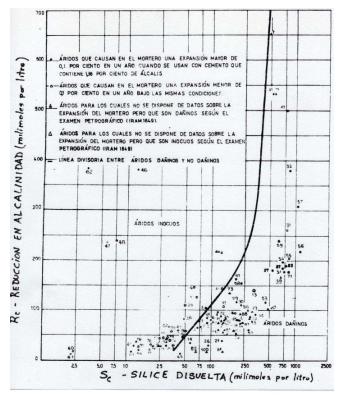


Figura 2.3 Gráfico adaptado de la norma IRAM 1650

## 2.3 ASTM C 1260 Método acelerado de barras de mortero

Este método de prueba es una variante de ASTM C227 "Método de prueba estándar para la reactividad potencial con álcalis de combinaciones de cemento y agregados (método de barra de mortero)", que se retiró de las

especificaciones de ASTM en 2018. El desarrollo de este método requiere de muestras de concreto de 25 mm x 25 mm x 285 mm con granulometría estándar de los agregados según la ASTM C33 o ASTM C150. Sin embargo, la expansión del cemento en autoclave se limita al 0.20%. El procedimiento de ensayo se lleva a cabo mediante la inmersión completa de las muestras en 1N de solución de NaOH a 80°C (176°F) durante 14 días. Los resultados se obtienen en un plazo de 16 días a partir de la fecha de colada. Las expansiones de las barras de mortero de menos del 0,10% a los 16 días después de la colada son en su mayoría indicativas de agregados no reactivos.

Si la expansión promedio está entre 0.11% y 0.20%, los agregados probados se designan como "lentos o moderadamente reactivos". Por lo que este tipo de agregado requiere otro tipo de ensayo (ensayo en prisma de concreto de 1 año o un comportamiento de campo para determinar su reactividad. Si la expansión promedio supera el 0,30%, el agregado se designa como "perjudicialmente reactivo". Una expansión superior al 0,1% se considera reactiva y se considera deletérea. Algunos investigadores (K.J. Folliard 2006, L.J. Malvar 2006 y W. Jin 1999) concluyeron que el umbral de expansión del 0,10 % es inadecuado para caracterizar la susceptibilidad de algunos agregados a la expansión RAS; por ello, R. D Hooton 1991 propuso la ampliación de los días de ensayo a 28 y 56 días con un límite de expansión del 0,28 % y 0,48 % respectivamente, para una clasificación adecuada de los agregados reactivos lentos.

Aunque este método de prueba facilita una evaluación relativamente "rápida" de la susceptibilidad agregada de RAS, se sabe que produce resultados falsos positivos y falsos negativos en varios casos. En otras palabras, los agregados que no muestran susceptibilidad a RAS en el campo pueden ser designados por esta prueba como reactivos (falso positivo); De manera similar, los agregados que muestran susceptibilidad a la RAS en aplicaciones de campo, pueden ser designados por esta prueba como no reactivos (falso negativo). Folliard y otros 2006 (K.J. Folliard, R. Barborak 2006) informaron que cuatro de sus agregados evaluados pasaron la prueba ASTM C1260, pero fallaron en la prueba de prisma de concreto (ASTM C1293). Los resultados determinados como agregados no reactivos con la ASTM C 1260 pero como agregados reactivos con la ASTM C1260 a 1 año de duración de la prueba. Una de las controversias de esta norma es la duración del ensayo.

Aunque ampliamente aceptado en la práctica, los investigadores han identificado que esta prueba tiene las siguientes limitaciones:

1. Las duras condiciones de prueba a menudo pueden dar lugar a resultados falsos positivos (D. Lu, B. Fournier 2008);

- 2. Esta prueba requiere que los agregados gruesos sean triturados, lavados y clasificados hasta un tamaño de arena inferior a 4,75 mm. La trituración excesiva puede alterar la disponibilidad de sílice reactiva dentro de la matriz del agregado; esto puede conducir a una reactividad agregada diferente durante la prueba (E.R. Latifee 2015);
- 3. Este proceso de prueba implica una temperatura de almacenamiento de 80 °C (176 °F); esta temperatura es demasiado alta en comparación con las temperaturas típicas de exposición de campo y, por lo tanto, puede causar niveles poco realistas de expansión del gel RAS en las muestras de prueba (M.A. Bérube, 1992);
- 4. Las proporciones de la mezcla que se usarán durante esta prueba son fijas y, por lo tanto, este método de prueba no se puede emplear para evaluar una mezcla de concreto con una combinación específica de cemento, aditivos y agregados;
- 5. Un número excesivo de resultados falsos positivos y falsos negativos de esta prueba pone en duda la confiabilidad asociada con esta prueba.

Basándose en las deficiencias de este método, este procedimiento es desventajoso para el diseño de la mezcla de trabajo o para fines de mitigación. Es por esto que algunos autores concluyen que este método debería utilizarse únicamente para aceptar o rechazar agregados. Esto da lugar a la norma ASTM C1293.

# 2.4 ASTM C 1293 Método de prueba estándar para determinar el cambio de longitud del concreto debido a la reacción álcalisílice en prismas de concreto

Este método de ensayo cubre la determinación de la susceptibilidad de un agregado o de una combinación agregado-puzolana o agregado-escoria para el desarrollo de expansión debido a la reacción álcali-sílice determinada mediante la medida del cambio de longitud de prismas de concretos curados en condiciones controladas. Cuando se prueba una combinación agregado-puzolana o agregado-escoria, los resultados se utilizan para establecer las cantidades mínimas de la puzolana o escoria necesarias para evitar la expansión perjudicial

Para medir la expansión se elaboran prismas de 75 x 75 x 300 mm3, utilizando una mezcla que contiene un volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto de 0.70±0.2%, una relación a/c entre 0.42 y 0.45, un contenido de cemento de 420 Kg/m3 y una cantidad de álcalis

equivalente de 5.25 kg/m3. El agregado en estudio se debe combinar con un agregado calificado como no reactivo. Luego de moldeado los prismas, se curan durante 24 h y se desmolda. Seguidamente se realiza la lectura inicial y se colocan dentro del contenedor de almacenamiento, con 20± 5 mm de agua desde el fondo del mismo y una base para evitar que los prismas estén en contacto con el agua, la temperatura de curado es de 38±2 °C.

Para este ensayo se emplea un cemento portland con un contenido de álcalis equivalente de 0.9±0.1%, que luego se incrementa a 5.25% adicionando NaOH al agua de mezclado, para medir la susceptibilidad de los agregados silíceos reactivos a expandir en el término de un año de curado a 38°C y 100% HR. Inicialmente, el contenido unitario de cemento de la mezcla era de 310 kg/m3, pero fue elevado a 420 kg/m3 (Davies y otros 1987), manteniendo el límite de expansión en 0.04 % a un año. Desafortunadamente, algunos agregados, tales como grauvacas (roca sedimentaria escasamente seleccionada con elevado contenido de matriz de composición variada) y arcilitas, cuando se eleva el contenido de cemento son clasificados como reactivos, de acuerdo al criterio de CSA A23. Este incremento excesivo del contenido de cemento en la mezcla lleva a clasificar algunos agregados como deletéreos cuando los mismos agregados presentan un comportamiento satisfactorio en obras en servicio. Por ejemplo, una caliza no reactiva, fue diagnosticada como potencialmente reactiva con el método Draft BS812, que contiene 700 kg/m3 de cemento, mientras que el mismo agregado fue clasificado como no reactivo por el método NBRI (expansión de 0.075%). Por lo tanto, hay que determinar el diseño óptimo de las mezclas para que el ensayo del prisma de concreto permita obtener resultados que sean comparables (Grattan-Bellew 1989). En general, este método es considerado como muy confiable y tomado como ensayo de referencia para todo tipo de agregados.

A continuación, se indican factores que pueden modificar la clasificación como potencialmente reactivo de un agregado.

Diseño de las mezclas, contenido de cemento que fue cambiando.

Relación a/c: afecta la expansión, pero el autor (Grattan-Bellew 1989) no obtuvo conclusiones.

Temperatura y humedad relativa (HR>95%) de los contenedores de almacenaje: cuando se evaluó la expansión de agregados silíceos de reactividad lenta, es esencial almacenar a 38 °C los prismas. Grattan-(Grattan-Bellew y otros 1987) observó que, en el método del prisma de concreto, ocurre lo contrario al método de la barra de mortero, dado que

al sacarles el revestimiento absorbente en el interior del contenedor (mecha) se produce una disminución en la expansión.

La finura del cemento: modifica la expansión del prisma de concreto, al aumentar la finura del cemento, la máxima expansión se puede obtener en pocos meses, ya que los álcalis entran en solución rápidamente. Se ha reportado que a mayor finura del cemento hay una mayor expansión de los prismas de concreto (Krell, J. 1986), los mismos efectos probablemente ocurran en las barras de mortero.

Tamaño y distribución de partículas del agregado: afecta la expansión de los prismas de concreto, Grattan-Belew (Grattan-Bellew y otros 1987) considera que se debe obtener una expansión óptima. Como criterio para evaluar los resultados del ensayo del prisma de concreto se pueden observar fisuras en el concreto cuando la expansión es aproximadamente 0.04%, límite especificado por CSA A23.1, al que se adhirieron muchos otros países como USA, Argentina, la Comunidad Europea. La *Cement and Concrete Association* considera deletéreos a los agregados cuando la expansión supera el límite de 0.05% a los 6 meses y además si al examinar el concreto se confirma que la causa probable del deterioro es la RAS.

## 2.5 AASHTO TP 110 Prueba del prisma de concreto en miniatura

Este método de ensayo fue desarrollado en 2014 por Latifee y Rangaraju (E.R. Latifee y otros 2015). Este método de ensayo se desarrolló como una alternativa para superar las dificultades encontradas en los métodos de ensayo ASTM 1260 y ASTM 1293. Este método proporciono buenas correlaciones con los resultados de ASTM C1293. Además, está comprobado que produce resultados fiables y seguros sobre la susceptibilidad de los agregados a la RAS. Esto se logró mediante la modificación adecuada de las características (corta duración, la trituración, el tratamiento excesivo de los agregados finos, la elevada temperatura de almacenamiento de 80°C y el pequeño tamaño de las muestras, de la ASTM C 1293 la temperatura de ensayo más baja, que dio lugar a una mayor duración del ensayo y el almacenamiento de las muestras en un entorno de una HR del 100%, que permitió la lixiviación de álcalis de las muestras) de los métodos de la prueba acelerada y de prismas de concreto.

Así, el método AASHTO TP 110 proporciona un enfoque adecuado para la evaluación de la RAS, en el que los prismas de concreto se almacenan en una solución de NaOH 1 N a 60 °C durante 56 días (u 84 días para los agregados de reacción lenta). A diferencia del método ASTM C 1260, la

temperatura especificada de 60 °C minimiza la posibilidad de obtener resultados falsos positivos debido a una condición agresiva, mientras que los 56 días de ensayo limitan la posibilidad de lixiviación alcalina observada en el método ASTM C1293. Sin embargo, el aumento de la temperatura de 38 °C (como se utiliza en el método ASTM C1293) a 60 °C en el método AASHTO TP 110 puede influir en el mecanismo de RAS del hormigón y en los productos de reacción. Maraghechi 2016 y Kleib 2018 et al., informaron sobre la cinética y el producto de la formación de RAS en términos de cambio de temperatura.

Se demuestra que la solución saturada de portlandita ralentiza la disolución de sílice a bajas temperaturas. A mayor temperatura, se observa un mayor aumento de los iones OH- (presentes en la solución de poro), que atacan a los grupos silanol y siloxano. El ataque continuo da lugar entonces a la formación de iones de sílice disueltos; de ahí que estos iones se precipiten a continuación por la acción de los cationes formando gel de sílice alcalina Kleib 2018 et al.

En la Tabla 3 de la AASHTO TP 110 se resumen las principales características del método (Berra 2005). Este método adopta el uso de un prisma de hormigón de 50 mm x 50 mm x 285 mm (2-in x 2-in x 11,25-in), en lugar de utilizar la barra de 25 mm x 25 mm x 285 mm o la de 75 mm x 75 mm x 285 mm adoptadas en ASTM C 1260 y ASTM C1293 respectivamente, acomodando la evaluación tanto para los agregados finos como para los gruesos a la expansión debida a la RAS (E. R. Latifee 2013 y 2016). Se considera aceptable una dilatación del prisma del hormigón inferior al 0,04 % a los 56 días; los valores superiores se consideran reactivos. Además, se prevén 28 días adicionales (lo que hace 84 días) para determinar los posibles agregados reactivos lentos. El AASHTO TP 110 adoptó el almacenamiento de las probetas de ensayo en una solución de NaOH 1 N y a una temperatura de 60 °C para acelerar la RAS utilizada en el método ASTM C 1260. Asimismo, implementa la característica beneficiosa del método ASTM C1293, como el aumento del álcali equivalente al 1,25 % en el concreto y el uso del prisma de hormigón en lugar de la probeta de mortero E. R. Latifee 2016.

En la prueba se empleó un tamaño máximo de agregado grueso de 12 mm (1/2 pulg) en lugar de un tamaño máximo de 19 mm (¾ pulg.) (como en la ASTM C1293) sin triturar los agregados (como en el ASTM C 1260) para acelerar la reacción RAS. Sin embargo, este método AASHTO TP 110 no ha demostrado ser eficaz para el rendimiento en campo, ya que sólo se han llevado a cabo unos pocos estudios (E. R. Latifee 2013, 2015 y H. Konduru 2020) sobre el uso del método, y se necesita más investigación para arrojar luz sobre este aspecto junto con una correlación y calibración con el

rendimiento en campo de los agregados para validar los resultados de la prueba. Una vez más, la prueba sólo consideró dos fracciones gruesas de gradación de agregados (12,5 mm y 9,5 mm); esto es insuficiente para evaluar el rendimiento de otras fracciones de tamaño grueso que se utilizan en el campo. En la investigación previa sobre AASHTO TP 110, muchos de los agregados evaluados eran agregados altamente reactivos o agregados no reactivos. En consecuencia, no se dispone de información suficiente para evaluar la reactividad de muchos otros tipos de agregados (agregados poco y moderadamente reactivos). En esencia, la versatilidad de la AASHTO TP 110 requiere más estudios.

Clasificación de la reactividad de los agregados a la RAS según cada método

La tabla 4 AASHTO TP 110 muestra la clasificación de la reactividad de los agregados según los diferentes métodos de ensayo (E. R. Latifee 2015 y Nixon 2017). Una barra de mortero que presenta valores de expansión inferiores al 0.10 % a los 14 días se considera no reactiva según el método ASTM C 1260. En comparación, una barra de mortero que muestra valores de expansión entre 0,30 % y 0,45 % a los 14 días se considera que contiene agregados altamente reactivos. Para los métodos AASHTO TP 110 y ASTM C1293, los valores de expansión que son inferiores a 0,040 % a 56 días y 1 año, respectivamente, se consideran agregados no reactivos. Los prismas de hormigón que presentan valores de expansión entre 0,040 % y 0,120 % a 56 días (método AASHTO TP 110) y a 1 año (método ASTM C1293) se consideran agregados moderadamente reactivos, mientras que los prismas de hormigón que presentan valores de expansión entre 0,120 % y 0,240 % a 56 días (método AASHTO TP 110) y a 1 año (método ASTM C1293) se consideran agregados altamente reactivos. Los prismas de hormigón que muestran valores de expansión superiores al 0,240 % representan agregados muy altamente reactivos.

etodología para la determinación de la reacción álcali-sílice (RAS)						

## 3. Metodología de caracterización de la RAS

Las caracterizaciones de la reactividad de las RAS se pueden dividir en dos ramas, la caracterización del componente (agregado) y la caracterización de los concretos ya fraguados. Esto se representa en el siguiente diagrama (Figura 3.1):

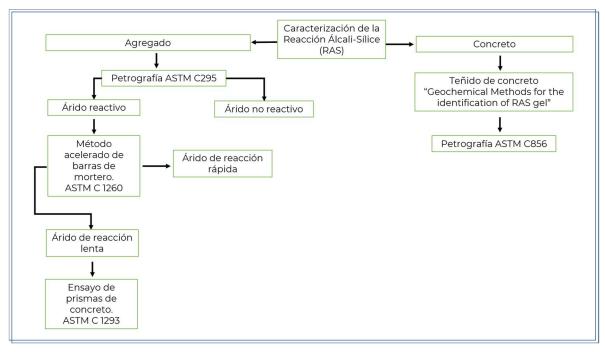


Figura 3.1 Diagrama para la caracterización de la RAS en agregados y muestras de concreto

A continuación, se presenta un diagrama para la realización y seguimiento del ensayo.

## 3.1 Diagrama para caracterizar agregados por petrografía (ASTM C 295)

Este resumen describe los procedimientos para el examen petrográfico de muestras representativas para su uso como agregados en mezclas cementosas o como materias primas para su uso en la producción de tales agregados (Figura 3.2).

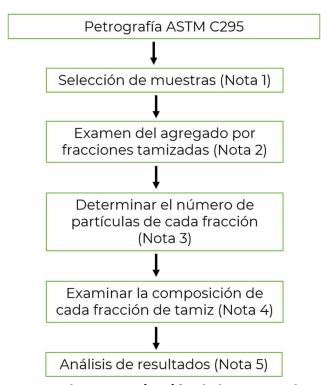


Figura 3.2 Diagrama para la caracterización de la RAS por la norma ASTM C295

Nota 1: Las muestras de grava y arena natural para examen petrográfico deben tamizarse en seco de acuerdo con el Método ASTM C136 para proporcionar muestras de cada tamaño de tamiz.

-En el caso de arenas, se debe analizar una porción adicional de acuerdo con el método de prueba ASTM C117, guardando el agua de lavado y eliminándola mediante secado para proporcionar una muestra del material que pasa el tamiz de 75 μm (n° 200) (Consulte la Especificación ASTM E11).

Los resultados del análisis de tamiz de cada muestra realizado de acuerdo con el Método C136 deben proporcionarse al petrógrafo que realiza el examen y utilizarse para calcular los resultados del examen petrográfico.

Nota 2: Cada fracción del tamiz debe examinarse por separado, comenzando con el tamaño más grande disponible. Las rocas se reconocen más fácilmente en piezas más grandes; la descomposición de

un tipo heterogéneo presente en los tamaños más grandes puede haber proporcionado partículas de varios tipos aparentemente diferentes en los tamaños más pequeños. Algunos tipos importantes y que se confunden fácilmente pueden reconocerse con el microscopio estereoscópico si primero se reconocen y separan en los tamaños más grandes, pero pueden requerir un examen con el microscopio petrográfico si se encuentran por primera vez en los tamaños más pequeños.

Nota 3: El número de partículas de cada fracción de tamiz a examinar vendrá fijado por la precisión requerida de determinación de los constituyentes menos abundantes. Suponiendo que los procedimientos de muestreo de campo y de laboratorio sean precisos y confiables, la cantidad de partículas examinadas, identificadas y contadas en cada fracción del tamiz dependerá de la precisión requerida de la estimación de los constituyentes presentes en pequeñas cantidades. Los números dados en este método son mínimos. Se basan en la experiencia y en consideraciones estadísticas. Se cree que se deben identificar y contar al menos 150 partículas de cada fracción de tamiz para obtener resultados confiables. Las determinaciones precisas de pequeñas cantidades de un componente importante requerirán recuentos de un mayor número de partículas.

-Si la muestra de una fracción de tamiz contiene muchas más partículas de las que necesitan ser identificadas, la muestra debe reducirse de acuerdo con uno de los procedimientos de la Práctica ASTM C702, de modo que contenga una cantidad adecuada de partículas para el examen.

Nota 4: Calcular la composición de cada fracción de tamiz de una muestra heterogénea y la composición promedio ponderada de toda la muestra de la siguiente manera:

Expresar la composición de cada fracción tamiz sumando el número total de partículas de esa fracción contada y calculando cada constituyente en cada condición como un porcentaje de la cantidad total (como número de partículas en porcentaje, en cada fracción tamiz). Es conveniente calcular y registrar los porcentajes a décimas en esta etapa. Un ejemplo de estos cálculos se da en la mitad superior de la Tabla 2 de la ASTM C295.

#### Nota 5:

- -Obtener el porcentaje en masa de la fracción del tamiz en la muestra completa (porcentajes individuales retenidos en tamices consecutivos) a partir de la clasificación de la muestra según lo determinado por el Método C136.
- -Al multiplicar el porcentaje del constituyente en la fracción tamiz, determinado como se describe arriba, por el porcentaje de la fracción tamiz en la muestra completa, obtenido como se describe arriba, calcular

el porcentaje en la muestra completa de ese constituyente en ese tamaño (porcentaje ponderado de constituyentes en la fracción tamizada, Tabla 2 de la ASTM C295). Es conveniente calcular y registrar estos porcentajes hasta las décimas.

-Al sumar los porcentajes ponderados de cada constituyente en cada fracción del tamiz, obtenga el porcentaje ponderado de cada constituyente en la muestra total (ver la composición ponderada de la muestra en la Tabla 2 de la ASTM C295).

-Construya una tabla para mostrar la composición de cada fracción de tamiz y la composición ponderada de la muestra completa. Reporte los valores al número entero más cercano. Indique como trazas los constituyentes que representen el 0,5 % o menos de una fracción del tamiz o de la muestra total. La Tabla 3 de la ASTM C295 es un ejemplo construido a partir de los datos obtenidos en la Tabla 2 de la ASTM. Como convención, el total en cada fracción de tamiz y el total en la muestra completa deben ser cada uno 100 % sin trazas. Las dificultades para cumplir con esta convención generalmente se pueden evitar agrupando componentes menores de poca importancia para la ingeniería. Es preferible tabular los constituyentes que se sabe que reaccionan de manera nociva en el concreto para que su distribución sea evidente al inspeccionar la tabla, incluso si la cantidad en la muestra total o en cualquier fracción es muy pequeña.

# 3.2 Diagrama para caracterizar agregados por el método acelerado de barras de mortero (ASTM C 1260)

El método se basa en la medida del cambio de longitud experimentado por una serie de probetas de mortero elaboradas con el agregado que se quiere estudiar, después de haber sido sumergidas en agua a 80 °C ± 2 °C (durante el primer día) y en una disolución de hidróxido sódico 1 N a 80 °C (durante los 14 días siguientes). El siguiente diagrama (Figura 3.3) de flujo indica el procedimiento a seguir:



Figura 3.3 Diagrama de proceso para la realización y seguimiento del método de ensayo por la ASTM C 1260

Nota 1: Obtención y preparación de la muestra acorde a la norma ASTM C 1260, Ver. Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características de las muestras para selección de agregado

Tamaño	del tamiz	24.34			
Pasa	Retenido en	% Masa			
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	10			
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	25			
1.18 mm (No. 16)	600 µm (No. 30)	25			
600 µm (No. 30)	300 μm (No. 50)	25			
300 μm (No. 50)	150 µm (No. 100)	15			

Fuente: ASTM C1260

Nota 2: Después de que el agregado se ha separado en las distintas fracciones, hay que lavar con agua para eliminar el polvo y las partículas finas (< 0,160 mm).

Nota 3: Elaborar el mortero con una parte de cemento por cada 2,25 partes de agregado (Porción del agregado =  $2.25 \times D^*/2.65$ ), en masa, y se utiliza una relación agua/cemento de 0,47 en masa. Hay que elaborar al menos tres probetas de 25,4 mm x 25,4 mm x 287 mm para cada agregado ensayado.

D\* = Densidad relativa del agregado

Nota 4: Coloque cada molde en la cabina o sala húmeda inmediatamente después de haber llenado los moldes. Las probetas permanecerán en los moldes durante 24 h ± 2 h.

Retire las probetas de los moldes y, mientras están protegidas de la pérdida de humedad, identifíquelas correctamente y realice una lectura comparativa inicial. Realice y registre la lectura inicial y todas las lecturas posteriores siguiendo los procedimientos de medición de cambio de longitud de la Especificación C490/C490M. Colocar las probetas realizadas con cada muestra de agregado en un recipiente de almacenamiento con suficiente agua del grifo para sumergirlas totalmente. La temperatura del agua utilizada para sumergir las probetas será de 23,0 °C ± 2,0 °C. Cerrar herméticamente los recipientes e introducirlos en un horno o baño maría a 80,0 °C 6 2,0 °C durante 24 h.

Lectura a cero: Saque los recipientes del horno o del baño maría de uno en uno. Retirar los demás recipientes sólo después de haber medido las barras del primer recipiente y haberlas devuelto al horno o al baño de agua. El tiempo transcurrido entre la retirada y el retorno de las muestras al horno o al baño de agua no deberá exceder de 10,0 min. Sacar las barras del agua de una en una y secar su superficie con una toalla prestando especial atención a los dos espárragos metálicos de calibración. Tomar la lectura cero (La barra de referencia debe leerse antes de cada juego de probetas, ya que el calor de las barras de mortero puede hacer variar la longitud del comparador) de cada barra inmediatamente después del secado, y leer tan pronto como la barra esté en posición. Completar el proceso de secado y lectura dentro de los 15 ± 5 s siguientes a la extracción de la probeta del agua.

Después de las lecturas, dejar el espécimen sobre una toalla hasta que se hayan tomado lecturas comparativas en el resto de las barras.

Colocar todas las probetas realizadas con cada muestra global en un recipiente con suficiente NaOH 1N, a  $80,0\,^{\circ}\text{C} \pm 2,0\,^{\circ}\text{C}$  para que las muestras queden totalmente sumergidas. Sellar el recipiente y devolverlo al horno o al baño maria.

Realice periódicamente las siguientes lecturas del comparador de las muestras, con al menos tres lecturas intermedias, durante 14 días después de la lectura cero, aproximadamente a la misma hora cada día. Si las lecturas se prolongan más allá del período de 14 días, realice al menos una lectura por semana. El procedimiento es idéntico al descrito en la sección sobre lecturas cero, salvo que las muestras se devuelven a su propio recipiente después de la medición.

Nota 5: Habría que ensayar varias combinaciones de agregado de ensayo con agregado fino no reactivo en los siguientes casos:

- Si el agregado está compuesto totalmente o en parte por un tipo de roca, arena, grava o mineral que tiene partículas o constituyentes minerales que se han asociado con el efecto pésimo, y los constituyentes reactivos se encuentran en concentraciones que se consideran potencialmente reactivas, o no se sabe dónde quedan los límites de seguridad.
- Cuando no se ha establecido si el tipo de roca o constituyente mineral tiene o no asociado una proporción pésima.
- Si la muestra es una mezcla de tipos de agregados, sin que se conozca el comportamiento de los agregados al combinarlos.
- Si no es posible un examen petrográfico.

El agregado no reactivo que se use para la combinación debe tener una expansión menor del 0,05% en este método de ensayo.

Nota 6: Calcule la diferencia entre la lectura comparativa cero del espécimen y la lectura en cada período con una aproximación del 0,001 % de la longitud efectiva del calibrador y regístrela como la expansión del espécimen para ese período. Registre la expansión promedio de los tres especímenes de una combinación dada de cemento-agregado al 0.01 % más cercano como la expansión para la combinación para un período dado.

Dependiendo de la expansión obtenida en las probetas, a los 14 días de tratamiento alcalino, se puede hacer la siguiente clasificación (norma UNE):

- Si la expansión es inferior al 0,10%, el agregado puede considerarse no reactivo.
- Si la expansión es superior al 0,20%, el agregado puede considerarse como potencialmente reactivo.
- -Si la expansión está comprendida entre 0,10% y 0,20%, realizar medidas de longitud de las probetas hasta 28 días. Si transcurridos los 28 días la expansión se mantiene entre 0,10% y 0,20%, es necesario obtener información complementaria para poder clasificar el agregado. Para ello, junto con el examen petrográfico y otros ensayos para evaluar su reactividad, puede realizarse un examen de las probetas después del ensayo para identificar los productos de la reacción mediante las técnicas de microscopía electrónica.

También, cuando sea posible, la experiencia sobre su comportamiento en la práctica puede utilizarse para evaluar su reactividad. Si transcurridos 28 días la expansión es superior a 0,20%, el agregado puede considerarse como potencialmente reactivo, aunque es conveniente obtener la información complementaria mencionada anteriormente para confirmarlo.

# 3.3 Diagrama para caracterizar agregados por el método de prismas de concreto (ASTM C 1293)

A continuación, se presenta un diagrama del proceso por el método ASTM C 1293 (Figura 3.4).

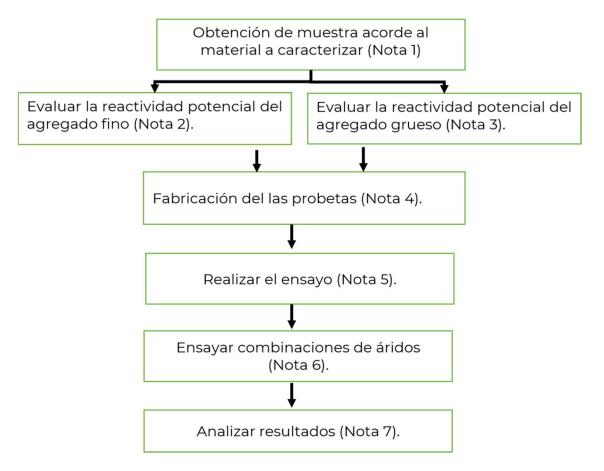


Figura 3.4 Diagrama de proceso para la caracterización de la RAS por ASTM C1293

Nota 1: \*Triturar el material más grande que el tamiz de 19.0 mm para que pase el tamiz de 19.0 mm. La operación de trituración se realizará de manera que se minimice la producción de material que pase el tamiz de 4.75 mm.

\*Tamizar el agregado grueso y tamizar de acuerdo a la tabla 3.2.

Tamaño del tamiz Fracción de masa Retenido Intermedio Pasa grueso 19.0 mm 12.5 mm 1/3 12.5 mm 9.5 mm 1/3 1/2 9.5 mm 4.75 mm 1/3  $\frac{1}{2}$ 

Tabla 3.2 Tamaño de agregado

Nota 2: Para evaluar el agregado grueso, use agregado fino no reactivo.

Nota 3: Para evaluar el agregado fino, use agregado grueso no reactivo.

Nota 4: \*La proporción de la mezcla de concreto es de 420 ± 10 kg/m³. Prepare tres probetas de acuerdo al método ASTM C157/C157M. Se recomienda fabricar una probeta adicional, que puede ser retirado en cualquier momento del ensayo y usado para realizar un examen petrográfico.

Siga el procedimiento del método de ensayo C157/C157M, excepto que no debe colocarse en agua de cal saturada. Realizar la lectura inicial de la longitud en el momento de la extracción del molde a una edad de 23.5 ± 0.5 h. A partir de entonces, mantener las probetas a 38 ± 2 °C en recipientes de almacenamiento de acuerdo con 5.2 de ASTM C1293.

Fabrique todos los especímenes colocados en un contenedor de almacenamiento determinado al mismo tiempo, de modo que todos los especímenes de ese contenedor deban leerse en el comparador al mismo tiempo.

Nota 5. Realizar el ensayo.

Coloque la muestra de vértice. Las muestras no deben estar en contacto con el agua del depósito del recipiente de almacenamiento. Selle el recipiente y colóquelo en un entorno de almacenamiento a  $38 \pm 2$  °C. En ningún momento el recipiente de almacenamiento deberá estar en contacto con las paredes o el suelo a  $38.0 \pm 2$  °C y deberá haber un flujo de aire adecuado alrededor del recipiente.

Cuando las muestras tengan 7 días, realice una lectura del comparador después de retirar el recipiente y el contenido del entorno de almacenamiento de acuerdo al siguiente punto. Se requieren lecturas posteriores a los 28 y 56 días, así como a los 3, 6, 9 y 12 meses cuando se comprueba la susceptibilidad de un agregado a la reacción expansiva álcali-sílice y, además, a los 18 y 24 meses cuando se comprueban combinaciones de agregados con puzolanas o escorias. Se sugieren lecturas adicionales más allá de las requeridas para la aplicación específica a intervalos de 6 meses.

Retirar los recipientes que contienen los prismas del entorno de 38  $\pm$  2.0 °C de temperatura y colocarlos en un entorno de temperatura controlada a 23  $\pm$  2.0 °C durante un período de 18  $\pm$  6 h antes de la lectura.

Identifique los especímenes para colocarlos en el comparador con el mismo extremo hacia arriba. Tras la lectura del prisma en el comparador, vuelva a colocar el espécimen en el recipiente de almacenamiento, pero invierta el extremo superior con respecto al período de almacenamiento anterior. De este modo, los prismas no se almacenan durante dos períodos de almacenamiento consecutivos con los mismos extremos hacia arriba.

Nota 6. Para el ensayo de combinaciones de agregados se repite el procedimiento (Nota 5).

Nota 7. Calcular el cambio de longitud entre la lectura inicial del comparador del espécimen y la lectura del comparador en cada intervalo de tiempo al 0.001 % más cercano de la longitud efectiva del calibrador y registrarlo como el cambio de longitud del prisma para ese período. Calcular el cambio de longitud medio en porcentaje para el grupo de prismas a la edad.

### 3.4 Diagrama para caracterizar el concreto por el método "Geochemical Methods for the identification of ASR gel"

A continuación, se presenta un diagrama del proceso por el método "Geochemical Methods for the identification of ASR gel (Figura 3.5).

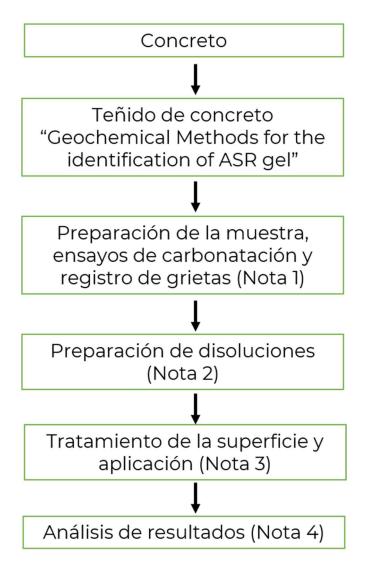


Figura 3.5 Diagrama de proceso para la identificación de gel de la reacción álcalisílice

*Nota 1:* Corte de la muestra de concreto, de preferencia sin aplicación/contaminación de agentes químicos provenientes de disco o herramienta de corte (lubricantes, pulido, etc.).

Aplicación de fenolftaleína sobre la cara superior, esperar unos segundos y medir la carbonatación, así como registrar las grietas.

*Nota 2:* Disolución acuosa saturada de Cobaltinitrito sódico y compuestos de rodamina

*Nota 3:* Limpieza con agua limpia, después, aplicar la disolución preparada en el punto anterior y dejar secar por unos 30 a 60 segundos.

Nota 4: La presencia de gel de sílice se tiñen de amarillo intenso, datos que se corroboran con un examen petrográfico y de microscopia electrónica de barrido.

En esta fase, se pueden observar regiones de tinción amarilla que indican la presencia de zonas con potasio soluble (intercambiable). Algunas regiones teñidas serán intensamente amarillas, mientras que otras se teñirán menos intensamente, dando una indicación aproximada de las variaciones relativas en el contenido de K en el gel. La tinción se intensificará a medida que se seque la superficie del núcleo. En cualquier fase posterior al aclarado, el tratamiento puede continuar del siguiente modo:

Tinción mediante compuestos de Cobaltinitrito de sodio.

La elección del compuesto de rodarnina afecta al patrón de tinción, como se explica a continuación. Cada uno de los compuestos tiñe de rosa algunos productos de degradación del concreto. Al principio nos centramos en la rodamina B (1), pero ahora consideramos que la rodamina B base es el compuesto de rodamina más utilizado, porque la rodamina B y la rodamina 6G son tinciones más agresivas que no son tan específicas para los productos del gel. Todos estos compuestos de rodamina dejarán el gel RAS rico en K teñido de amarillo, aunque algunos geles RAS que contienen pequeñas cantidades de K pueden teñirse tanto de amarillo como de rosa, dando como resultado un color anaranjado. La tinción (especialmente la debida a los compuestos de rodarnina) se desvanece en el transcurso de semanas a meses, pero las muestras pueden volver a teñirse siguiendo el mismo procedimiento.

El Na-cobaltinitrito es una mancha débil que requiere la presencia de potasio libremente disponible para fijarse a la superficie. En el concreto libre de RAS, la pasta de cemento contiene potasio en concentraciones lo suficientemente bajas como para que no aparezca ninguna tinción observable. Este método no es aplicable para agregados finos. El grado de RAS presente en el concreto se correlaciona con la cantidad de manchas amarillas, proporcionando un método de estimación visual rápido.

Tinción con compuestos de rodamina

G. D. Guthrie y otros 1998 que la rodamina B base era el compuesto más eficaz de este grupo. La rodamina B base es una forma no iónica de la rodarnina y era menos agresiva que la rodamina B como agente de tinción. En consecuencia, la rodamina B base ofrecía una sensibilidad superior a los mecanismos de deterioro y proporcionaba una mejor discriminación de la RAS.

Por lo general, el concreto sano sin deterioro visible no se tiñe con los compuestos de rodamina. En tales muestras, pueden aparecer manchas de concreto débil teñido de rosa no asociadas a un deterioro evidente. Tales manchas deben ser ignoradas en la aplicación de este método.

El concreto afectado por la RAS puede mostrar o no tinción por compuestos de rodamina. Sin embargo, se reportó que el concreto gravemente afectado a menudo mostraba una extensa tinción por rodamina B base. Esta tinción se produjo en las formas de Ca del gel de sílice y en la propia matriz. La tinción era particularmente aguda para el gel Ca RAS, y la rodamina B base resultó ser útil para localizar dicho gel. El gel Ca-RAS se interpreta como una forma químicamente modificada del gel RAS que se produce a distancia de la fuente del agregado reactivo. En algún momento durante la migración de este gel, intercambia su contenido alcalino por calcio con la pasta de cemento. Conserva su estructura porosa y gelatinosa, por lo que es susceptible a la tinción con rodamina B base. Sin embargo, carece de potasio y no se tiñe con Nacobaltinitrito (CoN<sub>6</sub>Na<sub>3</sub>O<sub>12</sub>).

### 3.5 Diagrama para caracterizar muestras de concreto por petrografía (ASTM C856)

En este apartado se presenta un caso analizado y representado mediante el siguiente diagrama de flujo para su seguimiento (Figura 3.6).

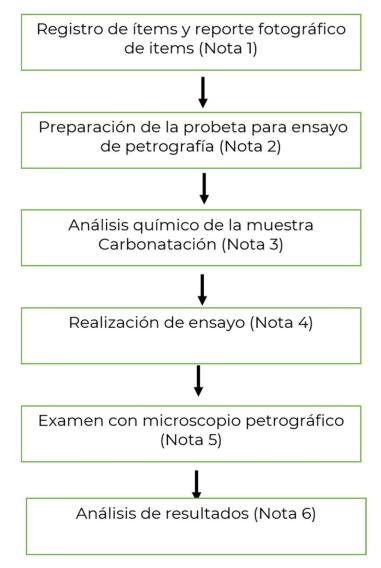


Figura 3.6 Diagrama de proceso para el seguimiento de caracterización de la RAS por la ASTM C856 (Caso de estudio)

A continuación, se presentan los resultados de una caracterización de RAS en muestras de concreto, basándose en las normas.

Nota 1: El registro de ítems se realizó en el formato que se presenta a continuación (Figura 3.7), en ella se registra información como: clave de identificación (ID), tipo de elemento, dimensiones y ensayos programables a realizar.

#				_	100													
					S		(mm)		(mm)	Ensayos							Observaciones	
	Tramo	Elemento	Kilómetro	Cuerpo	# Corazones	ID IMT	ID Muestra	Diámetro (m	Longitud (m	Petrografía	VPU	Resistividad	Porosidad	Carbonatación	23	Permeabilidad ion-clorum	Fluorescencia de ravos X	
							EE-1	94	118	1								
		Puente	44+050	Α	3	EE	EE-2	94	99	1								
							EE-3	94	157	1				1	1			
		Trabe	36+300	Α	1	BJ	BJ	95	106									
							0.4	00	444	_	./	./	1	_	_	_	_	

Figura 3.7 Formato de registro de ítems para su caracterización por durabilidad



Figura 3.8 Fotografías de los ítems recibidos para su caracterización por durabilidad, Fotografía izquierda corte y asignación, derecha inspección visual

En el registro de ítems, es importante anotar las dimensiones, ya que estas nos permiten optimizar la muestra para el número de ensayos programables. En la inspección visual se realiza la medición y registro de grietas en la superficie de la probeta y se toma una fotografía como evidencia. Se detectaron en la superficie superior unas pocas grietas finas orientadas al azar. Las porciones de relieve inferior de la superficie superior eran más duras que las porciones de relieve superior, por lo que la muestra se desboronaba al manipular la muestra.

Nota 2: Recorte vertical perpendicular de la muestra para obtener una placa de concreto de 1" de espesor. En la Figura 3.9 se observan grietas en la probeta cortada, estas grietas están creciendo hacia el interior, lo cual es característico de la RAS. Una de las grietas observadas se observó en toda la longitud de la muestra atravesando el concreto y los agregados.

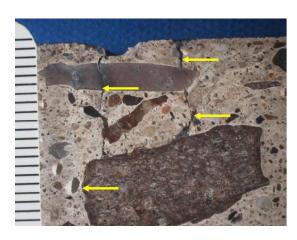


Figura 3.9 Corte vertical perpendicular de la probeta de concreto, presenta grietas hacia el interior

Nota 3: Posterior al corte se realiza la determinación de carbonatación de la probeta en la cara superior (Ver. Figura 3.10), aplicando indicador de fenolftaleína y dejando secar unos minutos, posterior se determina la profundidad de la carbonatación (la superficie teñida no presenta carbonatación).

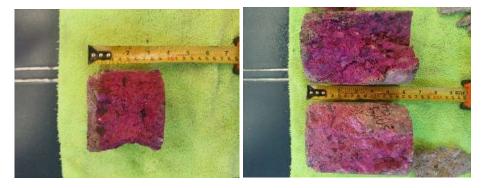


Figura 3.10 Ensayo de carbonatación a probetas de concreto

Nota 4: Los recortes de los especímenes examinados se sumergieron parcialmente en agua durante catorce días para facilitar las exudaciones de gel alcalino. Las superficies de corte expuestas se mantuvieron secas durante el periodo de inmersión. Después, del periodo de inmersión se aplicaron soluciones acuosas saturadas de cobaltinitrito sódico y rodamina D a las superficies de corte de las respectivas placas.

Nota 5: Tras una inmersión parcial en agua durante dos semanas, se observaron materiales finos, entre transparentes y blanquecinos, en el corte de la muestra, Figura 3.10. Se identificaron como geles alcalinos y geles alcalinos carbonatados. La tinción de un recorte de muestra con cobaltinitrito sódico y rodamina D confirmó la presencia de geles alcalinos en la pasta de cemento y en varias partículas de agregados gruesos y finos Figura 3.11.

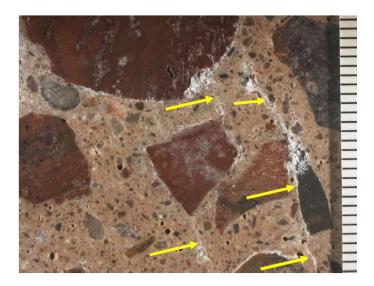


Figura 3.11 Identificación de la RAS en muestras de concreto en la SICT

Nota 6. La mancha amarilla se observó predominantemente dentro de las partículas volcánicas y de cuarcita observadas. El sodio cobaltinitrito reacciona con el potasio soluble (rico en geles alcalinos frescos) para producir un precipitado amarillo. La tinción se produjo en asociación con agregados reactivos, por lo que la presencia se evidencia la presencia de la RAS (Figura 3.12).

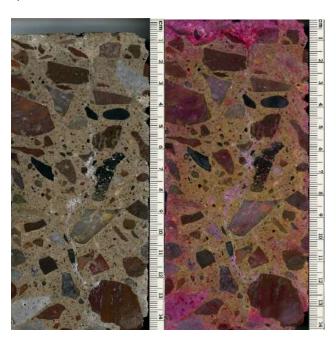


Figura 3.12 Probeta con tinción con cobaltinitrito sódico y rodamina D, revelando la presencia de geles alcalinos

A continuación, se presenta el cálculo de contenido de álcalis mediante el análisis químico semi-cuantitativo por fluorescencia de rayos x (XRF), revelando los siguientes datos (Ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Análisis químico puntual por XRF en probeta de concreto

		Contenidos de álcalis (%)						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	(Na <sub>2</sub> O + 0.658K <sub>2</sub> O)
19.35	69.5	3.98	3.8	0.73	0	2.56	0.07	5.178

El cálculo de contenido de álcalis en la muestra supera el 0.6% considerado máximo para ser susceptible a la RAS, por lo que se puede confirmar la presencia de la RAS en la muestra analizada.

Metodología para la determinación de la reacción álcali-sílice (RAS)							

#### **Conclusiones**

De acuerdo con la revisión de los métodos para identificar RAS. Ningún método de ensayo por sí solo, revela la presencia de la reacción álcali-sílice en los agregados o muestras de concreto, y queda establecido que los métodos son complementarios, por lo tanto, la combinación de diferentes técnicas permite obtener resultados fiables y reproducibles.

El empleo de la caracterización del agregado como de una muestra de concreto mediante la técnica de petrografía, requiere la experiencia del personal que realiza e interpreta los resultados, es decir, del apoyo de especialistas en geología.

La caracterización de la RAS para efectos de identificación se puede realizar en laboratorio y puede realizarse tanto para los agregados (para decidir si se utiliza el agregado o se rechaza en obra) y como para muestras de concreto que pueden ser núcleos extraídos en campo o fabricado en laboratorio.

etodología para la determinación de la reacción álcali-sílice (RAS)							

#### Bibliografía

- American Concrete Institute [ACI]. ACI Committe 221. (1998). State-of-theart report on alkali-aggregate reactivity. ACI 221.1R-98. En ACI Manual of Concrete Practise. American Concrete Institute (ACI): Farmingyon Hills, MI (EE.UU.).30. http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2211r\_98.pdf
- American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] AASHTO TP 110 Standard Method of Test for Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT) <a href="https://global.ihs.com/doc\_detail.cfm?document\_name=AASHTO%2">https://global.ihs.com/doc\_detail.cfm?document\_name=AASHTO%2</a> OTP%20110&item\_s\_key=00629840
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2021). *ASTM C 1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)* https://www.astm.org/c1260-22.html
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2017). ASTM C 457

  Standard Test Method for Microscopical Determination of
  Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete.

  <a href="https://www.astm.org/c0457\_c0457m-16.html">https://www.astm.org/c0457\_c0457m-16.html</a>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2017). *ASTM C289 Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method) (Withdrawn 2016.* https://www.astm.org/c0289-07.html
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2018). *ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates* <a href="https://www.astm.org/c0033\_c0033m-18.html">https://www.astm.org/c0033\_c0033m-18.html</a>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2018). ASTM C227 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method) (Withdrawn 2018) <a href="https://www.astm.org/c0227-10.html">https://www.astm.org/c0227-10.html</a>
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2022). *ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement.* <a href="https://www.astm.org/c0150\_c0150m-22.html">https://www.astm.org/c0150\_c0150m-22.html</a>

- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2020). *ASTM C1293 Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction* <a href="https://www.astm.org/c1293-20a.html">https://www.astm.org/c1293-20a.html</a>
- Asociación Española de Normalización [AENOR]. (1997). UNE-EN 932-3. Ensayos para determinar las propiedades generales de los agregados. Parte 3: Procedimiento y terminología para la descripción petrográfica simplificada.
- Ben Haha. (2007). *Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis* 10.1016/j.cemconres.2007.04.016
- Bérubé, M.A., Fournier, B., Mongeau, P., Dupont, N., Ouellet, C. & Frenette, J. (1992). Effectiveness of the accelerated mortar bar method, ASTM C-9 proposal P 214 or NBRI, for assessing potential AAR in Quebec (Canada). 9th Int. Conf. Alkali-Aggregate React. Concr., 1992, 92–101. <a href="https://icaarconcrete.org/wp-content/uploads/2021/10/9ICAAR-BerubeM-3.pdf">https://icaarconcrete.org/wp-content/uploads/2021/10/9ICAAR-BerubeM-3.pdf</a>
- Borge J. Wigum, CGK-Honnun Consulting Engineers, Iceland Lene T. Pedersen and Bent Grelk, Ramboll, Denmark, Jan Lindgard SINTEF, Norway. (2006). *Partner, Report 2.1 State of the art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction.*
- Blanks, R. F. & Meissner, H. S. (1945). Deterioration of concrete dams due to alkali- aggregate reaction. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 111* (1), 71. 3.https://ascelibrary.org/doi/10.1061/TACEAT.0005904
- Olague, C. (2011). Estudo das Reacções Álcalis-Sílica em Betões com Agregados Reciclados. 10.13140/RG.2.1.5082.7285
- CIRSOC 201-2005. (2005). *Reglamento argentino de estructuras de concreto.* Argentina: Presidencia de la Nación. Secretaría de Obras Públicas.
- Davies, G. & Oberholster, R. E. (1987). *An interlaboratory test programme on the NBRI accelerated test to determine the alkali reactivity of aggregates.* National Building Research Institute, Special Report CSIRO, Petroria, South Africa, 16.
- Fanijo. (2021). *Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States.* <a href="https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563">https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00563</a>

- Fava, A. S. C., Manuele, R. J., Colina, J. F. y Cortelezzi, C. R. (1981). Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el concreto de cemento pórtland. *Revista Técnica LEMIT, 85* (II).
- Folliard, K. J., Barborak, R., Drimalas, T., Du, L., Garber, S., Ideker, J., Ley, T. Williams, S., Juenger, M. & Fournier, B. (2006). *Preventing ASR/DEF in New Concrete.*
- Guthrie, G. D. & Carey, J.W. (1998). *Geochemical Methods for the Identification of ASR Gel.*
- Gutiérrez, M. P. A. & Bermúdez, M. A. (2003). *Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas: estudio bibliográfico.* CEDEX, Laboratorio Central de Estructuras y Materiales.
- Grattan-Bellew P. E. (1989). Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregate. Proceeding of the 8th International Conference Alkali-aggregate Reaction, Ed by Kiyoshi Okada, Shinzo Nishibayashi and Mitsunori Kawamura, Japan, p 279.
- Hobbs, D.W. (1988). *Alkali-silica reaction in concrete.* London, England: Thomas Telfor Ltd.
- Hooton, R.D. (1991). New Aggregates Alkali-Reactivity Test Methods, Ministry of Transportation. New Aggregate Alkali-Reactivity Test Methods (trb.org).
- Irassar, E. (2001). *Durabilidad del concreto estructural.* Asociación Argentina de Tecnología del Concreto, p. 157.
- Jensen, V. & Lorenzi, G. (1999). *RILEM Petrographic method for analysis of alkali reactive concrete aggregates.* 7th Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials. Grecia.
- Jin, W. (1999). *Alkali-Silica Reaction in Concrete With Glass Aggregate: a Chemo-Physico-Mechanical Approach*.
- Latifee, E.R. & Rangaraju, P.R. (2015). Miniature concrete prism test: rapid test method for evaluating alkali-silica reactivity of aggregates. *J. Mater. Civ. Eng. 27*(7), 4014215.
- Kammer, H. A. & Carlson, R. W. (1941). Investigation of causes of delayed expansion of concrete in buck hydroelectric plant. *Journal of the American Concrete Institute, 37,* 665. <a href="https://www.sid.ir/paper/536649/en">https://www.sid.ir/paper/536649/en</a>

- Krell, J. (1986). *Influence of mix design on alkali-silica reaction in concrete.*Proceeding of the 7th International Conference Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Ed by Patrick E. Grattan-Bellew, Canada, p 441.
- Locher. (2016). State of the art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction.
- Thomas, M., Fournier, B. & Folliard, K.J. (2013). *Alkali-Aggregate Reactivity* (AAR) Facts Book, Federal Highway Administration. Office of Pavement Technology. United States. <a href="https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26838">https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26838</a>
- Lanza, V. (2012). Estudio de la reactividad álcali-sílice originada por componentes reactivos minoritarios. Tesis Doctoral. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, canales y puertos. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción.
- Latifee, E.R., Rangaraju, P.R. (2015). Miniature concrete prism test: rapid test method for evaluating alkali-silica reactivity of aggregates. *J. Mater. Civ. Eng., 27*(7), 4014215.
- Lu, D., Fournier, B., Grattan-Bellew, P.E., Xu, Z. & M. Tang. (2008). Development of a universal accelerated test for alkali-silica and alkalicarbonate reactivity of concrete aggregates. *Mater. Struct. 41.* 235–246.
- Malvar, L.J. & Lenke. L.R. (2006). Efficiency of fly ash in mitigating alkalisilica reaction based on chemical composition. *ACI Mater.* J., 103 (5), 319-316.
- Meissner, H. S. (1941). Cracking in concrete due to expansive reaction between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker dam. *Journal of the American Concrete Institute, 37,* 549. <a href="https://www.semanticscholar.org/paper/Cracking-in-Concrete-Dueto-Expansive-Reaction-and-Meissner/224bf6f9c30fa6847d08e6abd0776bd3le6ed78c">https://www.semanticscholar.org/paper/Cracking-in-Concrete-Dueto-Expansive-Reaction-and-Meissner/224bf6f9c30fa6847d08e6abd0776bd3le6ed78c</a>
- Multon, S. & Toutlemonde, F. (2010). Effect of moisture conditions and transfer son alkali silica reaction damaged structures. *Cement and concrete Research*, 40(6).924-934.
- Olague, Castro and López, (2002). Reacción álcali-sílice en áridos para pavimentos de hormigón en el Estado de Chihuahua, México. *Materiales de construcción, 52 (268).*

- Ponce, J.M. y Batic, O. (2006). Different manisfestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. Cement and Concrete Research, 36(6), 1148-1156.
- Poole, A. (1992). Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. En the alkali-silica reaction in concrete. Swamy, R.N. Editor. Glasgow: Blackie and Son Ltd. <a href="https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203036631-3/introduction-alkali-aggregate-reaction-concrete-poole">https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203036631-3/introduction-alkali-aggregate-reaction-concrete-poole</a>
- Stanton, T. E. (1942). Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 107, 54.
- Velazco, A. (2014). Tesis Doctoral "Estudio experimental sobre la reacción álcali-sílice en el hormigon producida por áridos de reacción lenta. Universidad Politecnica de Madrid.





Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo" San Fandila, Pedro Escobedo C.P. 76703 Querétaro, México Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

<u>publicaciones@imt.mx</u>

http://www.imt.mx/