

INHIBICION DE LA REACCION ALCALI SILICE CON CENIZA VOLANTE (FLY ASH) AGREGADA AL HORMIGÓN

QUÉ ES LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE

Las primeras manifestaciones de reacción álcali sílice (RAS) fueron detectadas en 1938 por Stanton (figuras 1 y 2) y publicadas por primera vez en 1940. El trabajo de Stanton alertó a la comunidad respecto a que el hormigón podía expandir excesivamente debido a reacciones químicas entre los cementos con alto contenido alcalino y ciertos minerales de algunos esquistos, cherts y calizas impuras de la costa californiana. A la luz de sus hallazgos, en 1941 Kammer y Carlson reexaminaron la expansión de la presa hidroeléctrica de Buck (Virginia) concluyendo que su causa más probable también había sido la RAS. La presa había sido construida en 1912, los primeros signos se habían detectado en 1922 y para 1929 ya se encontraba en un proceso evidente y progresivo de expansión. En nuestro país, los primeros estudios de RAS registrados datan de 1950 y refieren al camino de hormigón a Punta Lara.

La RAS es una manifestación expansiva interna al hormigón que provoca deterioro progresivo y pérdida de capacidad de servicio. Las estructuras afectadas que pueden expandir libremente presentan un patrón de fisuras superficiales pseudo-hexagonal denominado mapeo que, en etapas avanzadas, conduce a hinchamiento sensible (figuras 1 y 3). En componentes que no pueden expandir libremente, como aquellos con una dimensión predominante o con armaduras de acero, las fisuras pueden alinearse paralelas a la dimensión principal o a las armaduras (figuras 2 y 4). Los labios de las fisuras pueden presentar color acaramelado debido a los geles expulsados por la RAS, los que también pueden volverse blanquecinos al carbonatarse en contacto con el aire (figura 4).

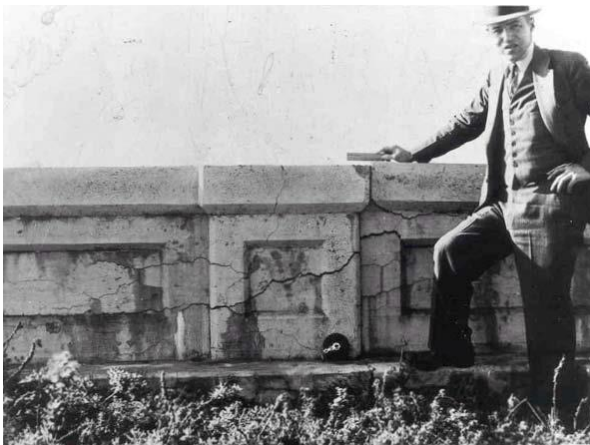


Figura 1: T. Stanton señalando la deformación por RAS sobre el parapeto de un puente



Figura 2: Fisuras longitudinales en la columna de un puente de hormigón afectado por RAS.



Figura 3: Mapeo y propagación longitudinal de fisuras sobre huella de tránsito pesado de una calzada de hormigón de menos de 10 años. [M.González, 2018]



Figura 4: Patrón rectangular sobre armaduras y geles exudados carbonatados sobre el pilar de hormigón de un puente [Forschung, HTW wisend, 2013]

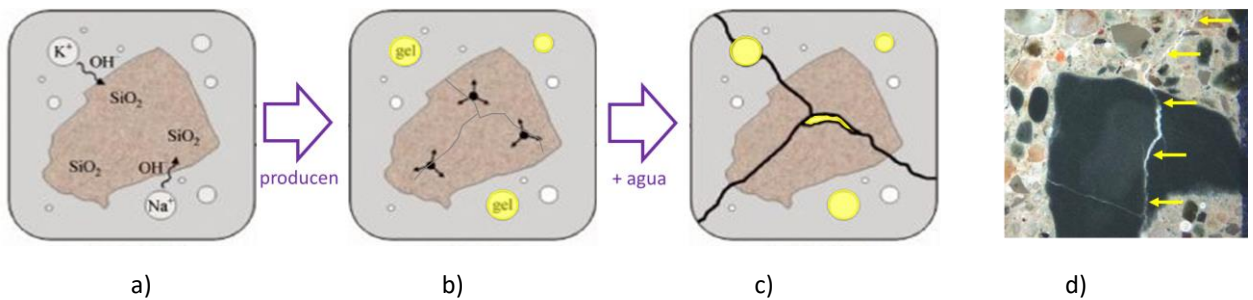


Figura 5: (a, b y c) Esquema secuencial de RAS alrededor de una partícula de agregado conteniendo minerales reactivos. (d) Agregados y hormigón reales fracturados y aureola de RAS en sector inferior derecho del agregado

El deterioro proviene de la reacción química entre la sílice reactiva de algunos agregados pétreos y los hidróxidos liberados por la mezcla de cemento y agua. Estos hidróxidos portan iones alcalinos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) de los cuales el sodio (Na^+) y el potasio (K^+) son los que provocan mayor concentración de hidroxilos (OH^-), es decir mayor pH o alcalinidad en el hormigón (figura 5a). Los OH^- promueven la disolución de la sílice reactiva formando un gel sílico-alcalino dentro y entorno al agregado reactivo (figura 5b) que absorbe ávidamente agua y, en presencia de calcio (Ca^{2+}), resulta expansivo provocando fisuras (figura 5b, 5c y 5d).

En resumen, la RAS progresa en el hormigón siempre que exista cantidad suficiente de iones Na^+ y K^+ , sílice reactiva y humedad relativa interna superior al 80-85%. La ausencia o el agotamiento de cualquiera de estos elementos esenciales significan respectivamente la inexistencia o la atenuación de la RAS.

Una vez iniciada la RAS no se detiene y se manifestará más rápido en estructuras de hormigón con agregados que contienen sílice amorfa y vidrio volcánico de reacción rápida (5 años o menos), o más lento en estructuras de hormigón con agregados que contienen cuarzo micro-cristalino, deformado o tensionado de reacción lenta (10 años o más). El aumento de la temperatura también acelera la velocidad de la RAS. Sin embargo, cualquiera sea su velocidad, siempre será suficientemente lenta para no provocar fallas catastróficas sino problemas progresivos de funcionalidad y servicio que a la vez

exacerban otros mecanismos de deterioro como el congelamiento y deshielo, el ingreso de sulfatos que degradan al hormigón o el de los cloruros que corroen el acero de refuerzo.

Tabla I: Ámbito de aplicación e instancia de uso recomendada* para los ensayos IRAM de uso frecuente.

Aspecto a evaluar	Petrografía IRAM 1649	Barra de mortero IRAM 1674	Barra de hormigón IRAM 1700 (60°C)	Barra de hormigón IRAM 1700 (38°C)
	exámen visual inmediato	expansión a 16 días	expansión a 3 meses	expansión a 1 año
	*preselección	*preselección	*selección	*selección
Reactividad potencial del agregado	✓	✓	✓	✓
Grado de reactividad del agregado				✓
Inhibición con adiciones		✓	✓	✓
Inhibición con cemento			✓	✓
Inhibición con aditivo			✓	✓
Inhibición con diseños de mezcla			✓	✓

Al diseñar las mezclas, los efectos de la RAS pueden evitarse con una o más de las siguientes estrategias:

- Reemplazar total o parcialmente los agregados reactivos por otros no reactivos.
- Minimizar el contenido de álcalis del cemento.
- Minimizar el contenido de álcalis del hormigón.
- Incorporar adiciones minerales activas que inhiban la RAS (entre ellas ceniza volante).
- Incorporar aditivos químicos que inhiban la RAS.

ENSAYOS PARA IDENTIFICAR LOS AGREGADOS Y LAS SOLUCIONES TECNOLÓGICAS

Las normas IRAM argentinas disponen de varios ensayos normalizados útiles para identificar desde la reactividad potencial de un agregado hasta la aptitud de una solución tecnológica para usarlo sin riesgos en la obra. La Tabla I detalla algunos de estos ensayos frecuentemente citados en reglamentos y pliegos de especificaciones técnicas de obras locales relevantes, incluyendo sus alcances y usos recomendados. Todo estudio de reactividad potencial debería iniciarse con un examen petrográfico, indispensable tanto para preseleccionar los agregados y sus ensayos de evaluación complementarios, como para definir e interpretar correctamente los resultados de los ensayos definitorios. Así para estudiar la reactividad potencial de un agregado, dependiendo del resultado del examen petrográfico, la experiencia local recomienda considerar los siguientes criterios respecto a la extensión de los ensayos:

- Si los agregados contienen minerales de reacción rápida, usar el método de barra de mortero IRAM 1674 con su límite de expansión de 0,10 % a 16 días, o el prisma de hormigón IRAM 1700 a 38 °C con su límite de expansión de 0,04 % a 1 año. Es decir, emplear los tiempos de ensayo estándar.
- Si los agregados contienen minerales de reacción lenta, prolongar los ensayos de barra de mortero IRAM 1674 y barra de hormigón IRAM 1700 a 38°C hasta los 28 días y 2 años respectivamente. Es decir, duplicar los tiempos de ensayo estándar.
- Al evaluar la capacidad de distintas soluciones tecnológicas para inhibir la RAS, prolongar la duración de los ensayos como si se tratase de agregados de reacción lenta.

INHIBICIÓN DE LA RAS CON CENIZA VOLANTE

La ceniza volante, o fly ash, es una adición mineral activa que ha sido muy usada en el país tanto para fabricar cemento portland como para producir mortero y hormigón. Sus propiedades son semejantes a las de las puzolanas naturales y, como ellas, su presencia en la pasta de cemento portland genera

silicato de calcio hidratado (CSH) equivalente al producto principal de la mezcla de cemento y agua, responsable de las propiedades resistentes y durables del hormigón.

Tabla II: características de la ceniza volante utilizadas en las experiencias del LEMIT.

Características Ceniza Volante	(%)
Dióxido de Silicio (SiO_2)	59,6
Oxido de Aluminio (Al_2O_3)	24,0
Oxido de Hierro (Fe_2O_3)	6,9
Oxido de Calcio (CaO)	4,9
Oxido de magnesio (MgO)	2,06
Trióxido de azufre (SO_3)	0,59
Oxido de Sodio (Na_2O) _{eq}	1,04
Pérdida por calcinación	0,72

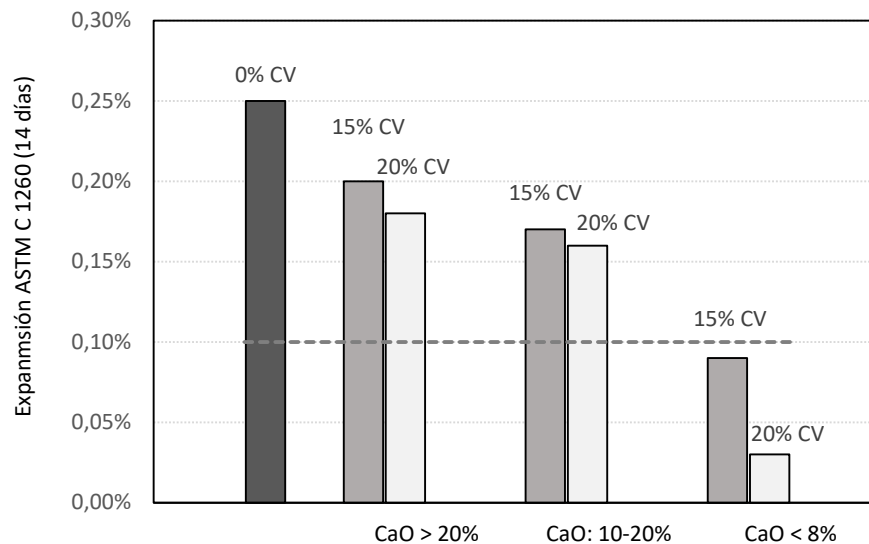


Figura 6: Efecto del reemplazo de distintas cenizas volantes (CV) sobre las expansiones por RAS de un agregado altamente reactivo en el ensayo acelerado de barra de mortero ASTM C 1260 [Detwiller 2002]

Sin embargo, a diferencia del cemento portland la ceniza volante no produce hidróxidos alcalinos y consume aquellos liberados por el cemento en los poros del hormigón. Esto implica que el CSH producido por la ceniza volante en el hormigón bien curado, rellena la porosidad remanente reduciendo su permeabilidad al agua. Ambos efectos disminuyen la disponibilidad de hidróxidos alcalinos y la movilidad del agua en contra del desarrollo de la RAS. Consecuentemente, la experiencia muestra que el uso de una ceniza volante apropiada en tipo y cantidad inhibe la RAS, reduciendo o eliminando las expansiones y fisuras perjudiciales para el hormigón.

La cantidad de ceniza volante necesaria para eliminar las expansiones depende de cada conjunto de materiales. En tal sentido, la figura 6 muestra la expansión por RAS de un determinado agregado potencialmente reactivo y su correspondiente reducción al reemplazar cemento por 15 y 20% de distintas cenizas volantes. El ensayo de expansión en mortero ASTM C 1260 reportado en la figura equivale a la barra de mortero acelerada IRAM 1674. En este ensayo el límite de expansión usualmente definido para evaluar la capacidad de inhibición de las adiciones minerales activas es de 0,10% a los 16 días. La figura muestra que la expansión disminuye a medida que aumenta el contenido de ceniza volante en el cemento. También evidencia que la capacidad de inhibición es mayor cuando disminuye el

contenido de calcio (OCa) de la ceniza. En el caso particular de los materiales ensayados, la inhibición es efectiva con 15 y 20% de la ceniza volante de más bajo contenido de calcio, sin embargo ninguno de los dos porcentajes son suficientes para inhibir la expansión con las cenizas volantes de mayor contenido de calcio.

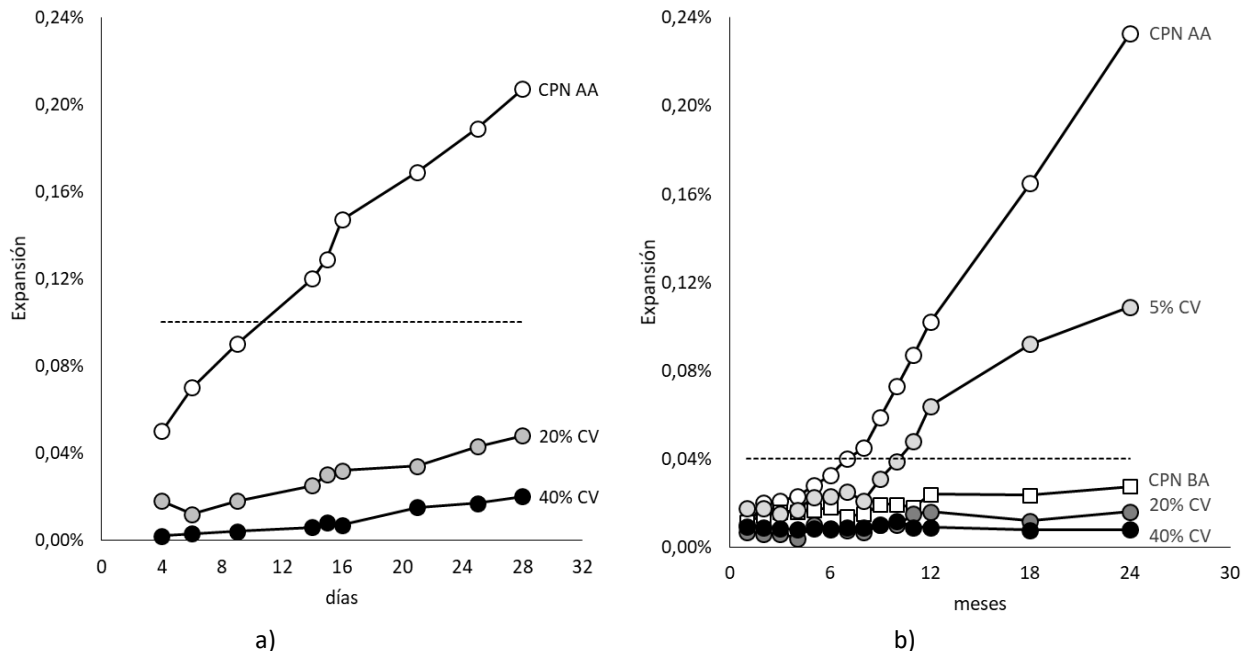


Figura 7: Inhibición de la expansión de un granito reactivo de la provincia de Buenos Aires con cemento de alto contenido de álcalis (CPN AA) y distintos reemplazos por ceniza volante (CV) de bajo calcio. Los ensayos sobre prisma de hormigón incluyen también un cemento de bajo álcalis (CPN BA) [Falcone, 2013]

A continuación se presentan resultados de estudios de inhibición de RAS con un agregado potencialmente reactivo de la provincia de Buenos Aires, dos cementos y una ceniza volante local de bajo contenido de calcio, evaluados en ensayos de expansión sobre mortero (IRAM 1674) y sobre hormigón (IRAM 1700) en el laboratorio de investigación tecnológica LEMIT. La Tabla II contiene las características químicas de la ceniza volante utilizada. La figura 7a) presenta la expansión en barra de mortero del agregado con cemento portland normal de alto contenido de álcalis. La figura evidencia la fuerte reducción de expansión provocada por el reemplazo de 20 y 40 % de cemento por ceniza volante (inhibe si expansión a 16 días <0,10%). Por otro lado, la figura 7b) muestra el mismo grupo de materiales evaluados por el método lento del prisma de hormigón IRAM 1700. A diferencia del anterior, este método no sólo permite visualizar el efecto inhibitor de la ceniza volante sino también compararlo con el de un cemento de bajo contenido de álcalis, notándose en este caso que el reemplazo con 20 y 40 % de ceniza volante proveyó un nivel de inhibición superior al del cemento de bajo álcalis de referencia (inhibe si expansión a 12 meses <0,04%)

AGREGADO DE CENIZA VOLANTE AL HORMIGON SEGÚN REGLAMENTOS Y NORMAS NACIONALES

Con diferentes objetivos y alcances, los reglamentos y las normas transfieren el conocimiento al campo regulatorio, constituyendo un marco de referencia con impacto civil y comercial. Para esbozar dicho marco a continuación se presenta el enfoque reglamentario y normativo nacional vigente a 2018 en lo que refiere a la inhibición de la RAS por agregado de cenizas volantes en la elaboración del hormigón.

Norma IRAM 1668 de Puzolanas y Cenizas volantes

La norma nacional “IRAM 1668. Puzolanas y cenizas volantes silíceas” establece los requisitos físicos y químicos que deben cumplir para poder utilizarlas en la fabricación de cemento y en la elaboración de hormigón. En lo relativo a la RAS, se les requiere una determinada capacidad de inhibición de la expansión. En tabla II se presentan los requerimientos normativos y los resultados de controles regulares de la ceniza volante Matermix, mostrando su aptitud general y su capacidad para reducir la expansión por RAS (Tabla III). Sus características químicas la emparentan directamente con los estudios publicados por el LEMIT.

Tabla III: características promedio ceniza volante Matermix 2017-2018

Requisitos Físicos IRAM 1668		Un	Min	Máx	Matermix	Método
Finura	Material menor a 45 µm	%	--	12	11	IRAM 1654-1
	Superficie específica	m ² /kg	300	--	376	
Índice de actividad puzolánica con cemento	a los 28 d	%	75	--	94	
Requerimiento de agua		%	--	115	100	
Diferencia entre valores de densidad de las partidas		%	--	3	2,29	IRAM 1624
Reacción álcali-agregado	Reducción de expansión a 14 d	%	75	--	78	IRAM 1648
Contracción por secado		%	--	0,03	0,02	IRAM 1654-1

Requisitos Químicos IRAM 1668		Un	Min	Máx	Matermix	Método
Pérdida por calcinación		%	--	12	6,3	IRAM 1654-2
Óxido de magnesio (MgO)			--	5	1,7	
Trióxido de azufre (SO ₃)			--	3	0,4	

Información Química complementaria		Un	Min	Máx	Matermix	Método
Dióxido de Silicio (SiO ₂)		%	--	--	56	
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)			--	--	21	
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)			--	--	8	
Óxido de Calcio (CaO)			--	--	4,5	
Óxido de Sodio equivalente (Na ₂ O) _{eq}			--	--	0,9	

Tabla IV: Contenido mínimo de ceniza volante para controlar RAS según IRAM 1531 e IRAM 1512.

Adición Mineral Activa	Contenido de álcalis de la adición (Na ₂ O) _{eq}	Contenido mínimo de adición en el cemento (% en masa)		
		Nivel de prevención B	Nivel de Prevención C	Nivel de prevención D
Ceniza volante	< 3,0 %	15	20	25
	de 3,0% a 4,5%	20	25	30

Reglamento argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201

El reglamento nacional de estructuras de hormigón fue actualizado en 2005 en base al Reglamento para hormigón estructural ACI.318. Su entrada en vigencia ocurrió recién en enero de 2013, cuando sus oportunos avances ya requerían alguna revisión, circunstancia a ser tenida en cuenta al interpretar el marco reglamentario vigente al presente (2018).

Para el caso específico de la inhibición de la RAS, este reglamento permite agregar adiciones minerales activas, como la ceniza volante Matermix, en la elaboración de hormigón sólo usando cemento portland normal (CPN IRAM 50.000) y demostrando que la combinación es efectiva para evitar la RAS. Esta directiva del reglamento argentino para agregar las adiciones minerales al hormigón ha perdido significado práctico, debido a que en el mercado local actual la disponibilidad de cemento de tipo CPN es casi marginal, mientras que la disponibilidad y uso de adiciones minerales activas, como la ceniza volante Matermix, es creciente. Consecuentemente, el enfoque reglamentario merece ser revisado con el objetivo de promover el uso seguro de las adiciones minerales agregadas en el hormigón, mejorar la durabilidad de las estructuras y contribuir a la sostenibilidad de la industria de la construcción.

Normas IRAM 1512 e IRAM 1531 de agregados para hormigón

En sus revisiones de 2013 y 2016 las normas IRAM 1512 y 1531 de agregados fino y grueso para hormigón incluyeron avances y nuevas soluciones para afrontar la RAS, las cuales funcionarán como un parche hasta la siguiente revisión reglamentaria. Estas normas, además de definir las características y propiedades generales de los agregados para hormigón, proponen una serie de medidas para inhibir la RAS con los agregados potencialmente reactivos. A tal fin, establecen distintos niveles de riesgo y prevención en función del grado de reactividad potencial del agregado a usar y del tipo de estructura de hormigón a construir. A continuación se esbozan sus directivas relacionadas al agregado de ceniza volante en el hormigón:

Mezclarla en planta de hormigón con un cemento de uso general IRAM 50.000 habiendo demostrado su efectividad para inhibir la RAS con los agregados a utilizar.

Incorporarla superando la cantidad mínima prevista en tabla IV para el nivel de prevención requerido.

Para el nivel de prevención más exigente (E), incorporarla superando el porcentaje mínimo previsto para el nivel de prevención D sin que el hormigón supere $1,8 \text{ kg/m}^3$ de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ aportado por el cemento.

CONSIDERACIONES FINALES

- La bibliografía especializada, los reglamentos y la normativa nacional e internacional reconocen desde hace décadas la capacidad de la ceniza volante para inhibir la RAS y lograr estructuras de hormigón más durables.
- La ceniza volante Matermix cumple los requerimientos normativos nacionales y reúne las características necesarias para inhibir eficientemente la RAS.
- La cantidad de ceniza volante Matermix necesaria para inhibir la RAS depende de las características particulares de cada grupo de materiales, debiendo siempre ser verificada mediante el conjunto de ensayos más adecuados para el tipo de agregado en estudio.
- El agregado de ceniza volante en el hormigón como inhibidor de la RAS se encuentra muy restringida por el reglamento CIRSOC 201 como consecuencia de la exigua disponibilidad de cemento tipo CPN en el mercado local. En tal sentido el productor de hormigón cuenta con directivas alternativas en las normas IRAM 1512 y 1531 de agregados fino y grueso para hormigón.

BIBLIOGRAFIA

- [1] American Concrete Institute ACI 232.2R-18, "Use of Fly Ash in Concrete", 2018.
- [2] American Concrete Institute ACI 201.2R-16, "Guide to durable Concrete", 2016.
- [3] IRAM 1531, "Agregado grueso para hormigón de cemento – Requisitos y métodos de ensayo", 2016.
- [4] IRAM 1668, "Puzolanas y Cenizas volantes síliceas. Características y muestreo", 2015.
- [5] United States Nuclear Regulatory Commission, Expanded Materials Degradation Assessment, 2015.
- [6] IRAM 1512, "Agregado fino para hormigón de cemento – Requisitos", 2013.
- [7] D.Falcone, "Antecedentes y Metodología de Ensayo para evaluar la Reacción Alkali Sílice" Tesis M Sc, UNCPBA, 2013.
- [8] Federal Highway Administration, "Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook", 2011.
- [9] Federal Highway Administration, "Report on the Diagnosis, Prognosis, and Mitigation of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Transportation Structures", 2010
- [10] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, "CIRSOC 201, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", 2005.
- [11] S.Kosmatka, et al "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association (PCA), 2004.
- [12] Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), "Durabilidad del Hormigón Estructural", 2001.
- [13] T.Stanton, "Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate", Proceedings of the ASCE, 1940.

Inq. Marcelo A. González – TecHo - marcelo.gonzalez@techo.com.ar