





Revisión sistemática de la reacción álcali-agregado: panorama comparativo de estudios realizados en Canadá y en Brasil

A. Frare^{1*} , E. Langaro¹ , D. J. de Souza² , M. H. F. Medeiros¹ 

*Autor de Contacto: frareandreza@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.628>

Recibido: 12/07/2022 | Correcciones recibidas: 26/11/20232 | Aceptado: 20/12/2022 | Publicado: 01/01/2023

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es comparar el desempeño de Canadá y Brasil en estudios relacionados con la reacción álcali-árido (RAA) en el hormigón, a través de una revisión cualitativa, cuantitativa y sistemática de la literatura, además de utilizar el software VOSviewer para análisis de co-citación y acoplamiento bibliográfico. Los datos recopilados indican que Canadá es el país que más se destaca en cuanto a investigaciones sobre RAA en el mundo, Brasil se encuentra en la séptima posición. El trabajo presentó los centros de investigación entre los dos países, las metodologías existentes para evaluar RAA y el panorama de la investigación sobre el tema en Brasil. Finalmente, el trabajo mostró temas emergentes sobre RAA y brechas de conocimiento.

Palabras clave: reacción álcali-agregado; durabilidad; reacciones expansivas; Canadá; Brasil.

Citar como: Frare, A., Langaro, E., De Souza, D. J., Medeiros, M. H. F. (2023), "Revisión sistemática de la reacción álcali-agregado: panorama comparativo de estudios realizados en Canadá y en Brasil", Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 1 – 27, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.628>

¹ Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil

² National Research Council e University of Ottawa, Ottawa, Canadá.

Contribución de cada autor

En este trabajo el primer autor aportó revisión bibliográfica, metodología aplicada, investigación, discusión de resultados y conclusiones con un porcentaje del 80%. El segundo y tercer autor contribuyeron con la revisión y revisión bibliográfica con un porcentaje del 20% y el cuarto autor contribuyó con la idea original, dirección y revisión del texto.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2022) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2023 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2023.

Systematic review on alkali-aggregate reactions: comparative overview of studies carried out in Canada and Brazil

ABSTRACT

The objective of this research is to compare the performance of Canada and Brazil in studies related to alkali aggregate reaction (AAR) in concrete, through a qualitative, quantitative and systematic review of the literature, in addition to using the VOS viewer software for co-analysis, citation and bibliographic coupling. The collected data indicate that Canada is the country that most stands out in terms of research on AAR in the world, Brazil is in the seventh position. The work presented the research centers between the two countries, the existing methodologies for assessing AAR and the panorama of research on the subject in Brazil. Finally, the work showed that among the emerging themes about AAR and knowledge gaps.

Keywords: alkali-aggregate reaction; durability; expansive reactions; Canada; Brazil.

Revisión sistemática de la reacción álcali-agregado: resumen comparativo de estudios realizados en Canadá y Brasil

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é comparar a atuação do Canadá e do Brasil em estudos relacionados a reação álcali agregado (RAA) no concreto, por meio de uma revisão qualitativa, quantitativa e sistemática da literatura, além de utilizar o software VOSviewer para análise de co-citação e acoplamento bibliográfico. Os dados levantados indicam que o Canadá é o país que mais se destaca em termos de pesquisa sobre RAA no mundo, o Brasil encontra-se na sétima posição. O trabalho apresentou os núcleos de pesquisa entre os dois países, as metodologias existentes para avaliação da RAA e o panorama da pesquisa sobre o assunto no Brasil. Por fim, o trabalho mostrou os temas emergentes sobre RAA e as lacunas de conhecimento.

Palavras-chave: reação álcali-agregado; durabilidade; reações expansivas; Canadá; Brasil

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La reacción álcali-árido (RAA) es uno de los mecanismos de deterioro más dañinos que afectan la durabilidad y vida útil de las estructuras de hormigón en el mundo. La RAA se puede dividir en dos tipos principales de reacción: reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC) (Fournier y Bérubé, 2000). La RAS, frecuentemente encontrada en estructuras de hormigón, se caracteriza por la reacción química entre los minerales de sílice inestables presentes en los áridos y los hidróxidos alcalinos (Na^+ , K^+ , OH^-) derivados, principalmente, de la hidratación del cemento Portland, mientras se disuelven en la solución de los poros del concreto. Por otro lado, RAC es un tipo de reacción menos común, cuyo mecanismo aún se desconoce en gran medida. Muchos investigadores consideran que la RAC es una reacción que ocurre entre los hidróxidos alcalinos y ciertos tipos de calizas dolomíticas. (Fournier e Bérubé, 2000; Beyene et al., 2013). En general, es un consenso que la RAC es acompañada de un proceso de desdolomitización y formación de calcita y brucita. (Thomas e Folliard, 2007). Diferentes estudios consideran que la RAC es una forma de RAS (Katayama et al., 2012, 2016), sin embargo, las características microscópicas de expansión y deterioro inducidas por RAC son bastante diferentes de las RAS y por tanto discriminadas (Sanchez et al., 2017), lo que justifica la distinción de los términos. Independientemente, ambos mecanismos de deterioración (RAS e RAC) están presentes en estructuras de hormigón de todo el mundo y son responsables por la generación de productos secundarios que provocan expansiones en la presencia de humedad. Con la expansión, que ocurre como consecuencia de la RAA, la durabilidad y las propiedades mecánicas del hormigón son perjudicadas, con el apareamiento de microfisuras en la estructura afectada (Fournier e Bérubé, 2000; Bérubé et al., 2005; Fournier et al., 2010; Naar, 2010; Kubo e Nakata, 2012; Zhu et al., 2021; Fiset et al., 2021).

Estudios relacionados a este tipo de reacción expansiva buscan evaluar el grado de reactividad de los áridos presentes en diversas regiones (Lu et al., 2006a; Lu et al., 2006b, Drolet et al., 2017a y Drolet et al., 2017b, Santos y Ribeiro, 2021). Otros buscan identificar adiciones minerales que puedan mitigar los efectos de la referida reacción (Duchesne y Berubè, 2001 y Grattan-Bellew et al., 2003; Gallo et al., 2007; Adorno et al., 2018; Adorno et al., 2020) y metodologías de evaluación con el objetivo de correlacionar técnicas de ensayos acelerados con los de campo (Ideker et al., 2010; Sanchez et al., 2014; Sanchez et al., 2015; Sanchez et al., 2016; Lindgard et al., 2016; Sanchez et al., 2017; Martin et al., 2017). Además, se han realizado estudios dirigidos a correlacionar la alcalinidad de la matriz de cemento con el desarrollo de la RAA (Shehata et al., 2000; Shehata et al., 2002; Shehata et al., 2006; Shehata et al., 2010).

Evaluar y estudiar el RAA es de suma importancia para caracterizar e identificar los factores que influyen en la vida útil de las estructuras de hormigón. Investigadores de varios países han tratado de comprender los efectos de la RAA desde que se identificó por primera vez. Entre los países que más publican artículos en revistas de alto impacto científico sobre AAR, se encuentra Canadá. Los investigadores brasileños tienen un importante historial de asociaciones e interacciones de investigación sobre este tema con investigadores que trabajan en Canadá. En ese contexto, la presente investigación consiste en realizar un levantamiento bibliográfico con el fin de analizar los principales temas relacionados con la RAA en estudios desarrollados por autores canadienses y brasileños, así como las metodologías evaluativas y los temas emergentes. La importancia de desarrollar este trabajo es producir una visión general para comprender mejor las tendencias relacionadas con los estudios de reacción álcali-árido en el entorno científico de los dos países involucrados. Además, el trabajo presenta una discusión importante sobre el uso del método acelerado de barras de mortero para la investigación de RAA, en comparación con métodos de más largo plazo como el ensayo en prismas de hormigón, considerado más realista, y con métodos de evaluación de daño como el Damage Rating Index (DRI) y el Stiffness Damage Test (SDT).

2. METODOLOGÍA

La investigación consiste en realizar una revisión cualitativa, integradora y sistemática con el fin de comparar los estudios y métodos de evaluación de la reacción álcali-árido en ambos países, Canadá y Brasil.

Primero se definió el término de búsqueda “Alkali-aggregate reaction” y posteriormente se buscó la palabra clave en las bases de datos Web of Science (WoS) y Scopus. Ambos presentan una excelente cobertura temporal, con registros desde los años 1945 y 1970 respectivamente, hasta el momento actual. Además, estas bases de datos incluyen una gran cantidad de revistas, eventos y editoriales con un sistema de revisión por pares, lo que contribuye a la variedad y calidad de las publicaciones. El período de búsqueda contemplado fue todo el espacio temporal disponible de las bases de datos, considerando todas las áreas de investigación registradas. La recolección de datos se realizó el 13 de enero de 2022.

Se realizaron análisis relacionados en cuanto al número de publicaciones en cada país, principales autores sobre el tema y número de citas. Finalmente, se buscó detallar las publicaciones y validar la evidencia a partir de análisis de cocitación y acoplamiento bibliográfico, lo que permite identificar la relación entre autores y referencias, tal como lo desarrollan Mariano y Rocha (2017). Para la conformación de las redes se utilizó el software VOSviewer 1.6.10, el cual lee los datos y utiliza algoritmos de agrupamiento, separándolos en grupos según las áreas de estudio.

2.1 Número de publicaciones - Brasil y Canadá

En la Figura 1 se identifica el número de publicaciones encontradas en las bases de datos Web of Science (WoS) y Scopus en revistas de alto impacto utilizando el término “Alkali-aggregate reaction” y la contribución de cada país sobre el tema. La figura muestra las publicaciones de los 10 países más destacados en la producción científica mundial sobre el tema de reacción álcali-árido. Observando la Figura 1, y sumando el número de publicaciones de las dos bases de datos, y excluyendo los trabajos repetidos, es posible clasificar los países. Así, se destaca que el país que más contribuyó a la investigación relacionada con la RAA fue Canadá con 215 publicaciones, seguido de Estados Unidos y China con 170 y 167 publicaciones, respectivamente. Brasil ocupa el séptimo lugar contribuyendo con 50 publicaciones.

Se encontró un total de 727 registros sobre RAA en la base de datos de WoS, siendo 113 de estas publicaciones canadienses y 33 brasileñas. En la base de datos Scopus se obtuvieron 1096 registros, donde Canadá aportó con 173 publicaciones y Brasil con 46. En general, con base en la información obtenida, parece que Canadá es el país que más aporta a los estudios relacionados con RAA, representando cerca del 22% del total, mientras que Brasil representa el 5,7%. Así, el número de estudios publicados sobre " Alkali-aggregate reaction" en Canadá es casi cuatro veces mayor que en Brasil.

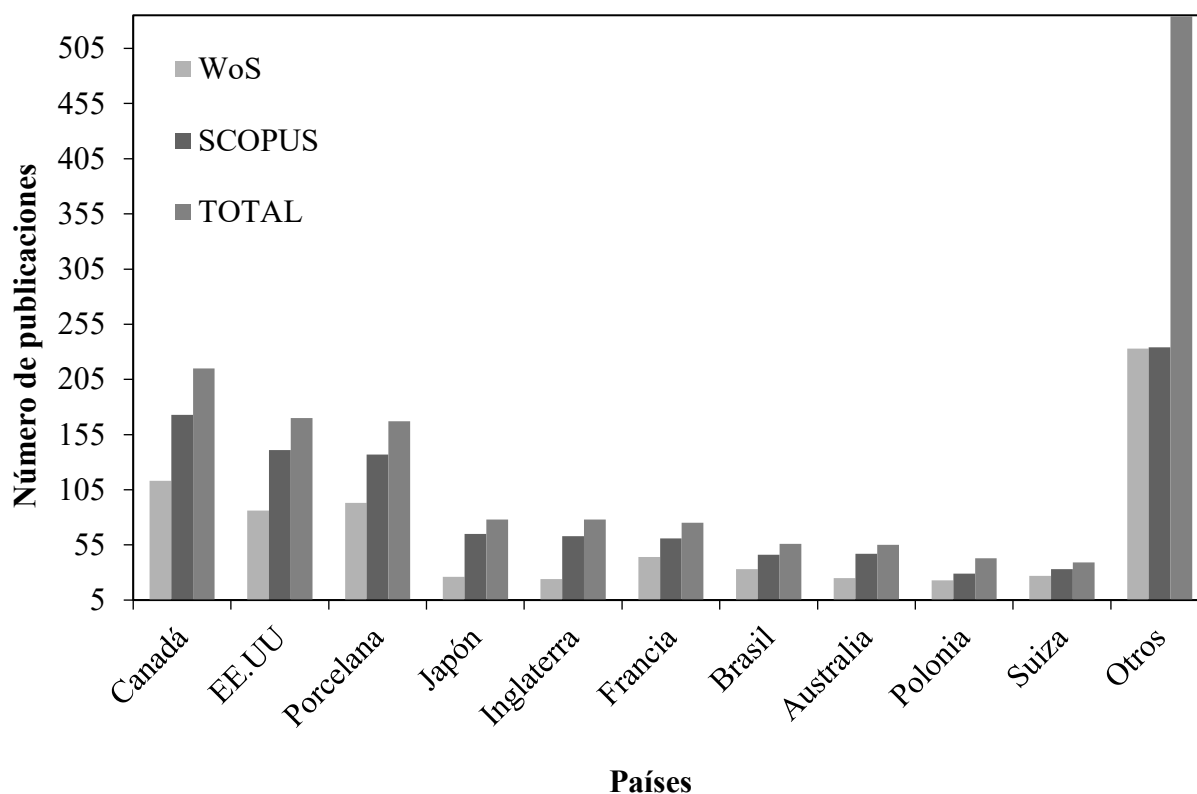


Figura 1. Número de publicaciones en las bases de datos WoS y Scopus con el término " Alkali-aggregate reaction " en el título.

2.2 Análisis de co-citación - Brasil e Canadá

El análisis de co-citación se basa en la frecuencia con la que dos autores o artículos se citan juntos en artículos posteriores. Esto indica una proximidad entre los temas de investigación abordados y los investigadores. Así, es posible distinguir a través de análisis iterativos un dominio de conocimiento (Hjørland, 2013).

La interconexión de citas caracteriza la investigación según su carácter social, histórico y dinámico y ayuda a identificar la dependencia de la literatura académica, lo que permite determinar los principales grupos de investigación relacionados con los temas de estudio y sus publicaciones de mayor impacto (Glänzel, 2003).

Las Figura 2(a) y 2(b) muestran los vínculos entre los principales grupos de investigación y autores relacionados con RAA en Canadá y Brasil, extraídos de las bases de datos WoS y Scopus, respectivamente.

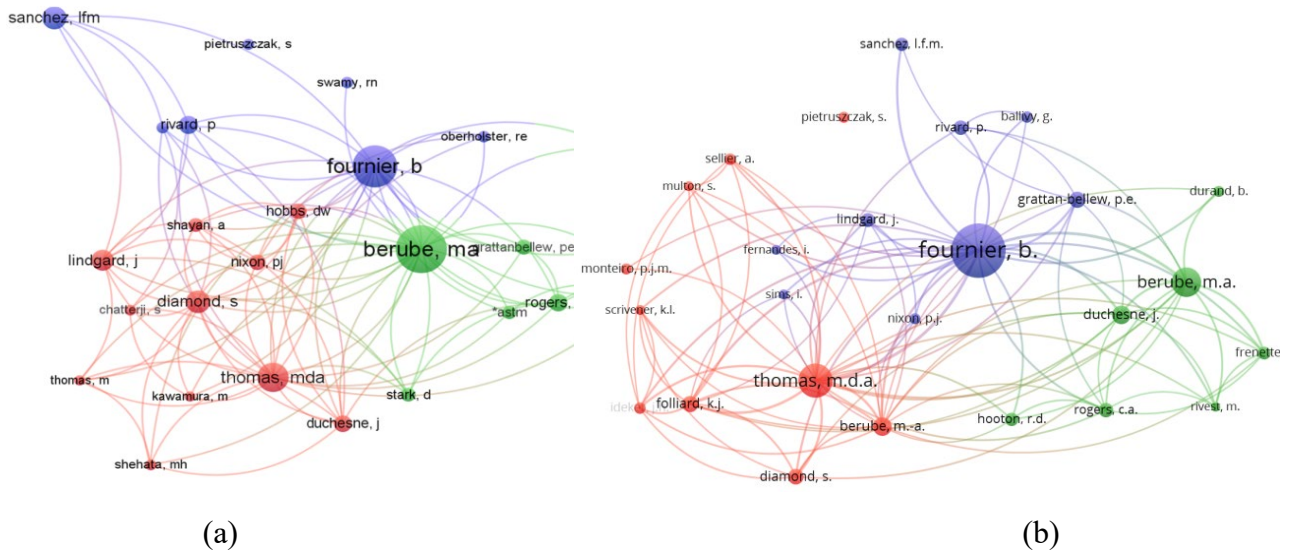


Figura 2. Interconexión entre los principales grupos de investigación centrados en investigar la reacción álcali-árido, con datos obtenidos en WoS (a) y Scopus (b).

Analizando las Figuras 2(a) y 2(b), se pueden observar tres grandes temas de investigación liderados por Fournier, Thomas y Berubè con 29, 21 y 14 publicaciones de cada autor, respectivamente, en las bases de datos WoS y para Scopus, excluyendo los trabajos repetidos.

Los tres grandes grupos de temas investigados están liderados por autores canadienses, y en estas líneas de investigación autores brasileños como Sánchez y Monteiro comparten similitud en temas, relacionados principalmente con técnicas evaluativas de RAA. El primero actúa como profesor de la Universidad de Ottawa, Canadá, y tiene interacción con el grupo de investigación del profesor Fournier, ubicado en la Universidad de Laval, ciudad de Quebec, también en Canadá. El segundo es actualmente profesor de la Universidad de California, Berkeley, Estados Unidos. Este también es parte de un grupo de investigación dirigido por Hasparyk en Furnas Centrais Elétricas, Departamento de hormigón y control de calidad, en Aparecida de Goiânia, GO, Brasil y en asociación con el Profesor Dal Molin de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. Los enfoques investigados por Monteiro interactúan significativamente con los temas estudiados por Thomas.

El siguiente capítulo busca profundizar en el tema de los trabajos desarrollados por los autores antes mencionados, a partir de una selección de los artículos con mayor número de citas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Temas de mayor relevancia entre los artículos con mayor número de citas.

La red de conexión entre los autores identifica la similitud de los temas estudiados. Se eligieron publicaciones publicadas a partir del año 2000, con más de cinco citas de cada autor enumerado anteriormente, para el análisis de las líneas de investigación.

Diversas investigaciones realizadas en conjunto con otros investigadores, abarcan una serie de temas relacionados con la reacción álcali-árido, convirtiéndose en una referencia en el tema, a nivel internacional.

Las investigaciones relacionadas con las metodologías evaluativas de RAA fueron realizadas por Ideker et al. (2010), Lindgard et al. (2012), Sánchez et al. (2014), Sánchez et al. (2015a), Sánchez

et al. (2015b), Sánchez et al. (2016a), Sánchez et al. (2016b), Lindgard et al. (2016), Sánchez et al. (2017) y Martín et al. (2017).

Los estudios indican que el Stiffness Damage Test (SDT) se puede utilizar como una forma de evaluar la RAA y el daño relacionado con la expansión del hormigón (Martin et al., 2017). Sin embargo, parámetros como las condiciones ambientales, las características de la muestra y el historial de acondicionamiento de la muestra parecen influir significativamente en los resultados de la prueba de carga cíclica. Por otro lado, los diferentes tipos de preparación de la superficie y el tamaño de la muestra no parecen modificar los resultados (Sanchez et al., 2014; Sanchez et al., 2015a; Sanchez et al., 2016a y Sanchez et al., 2017). El Damage Rating Index (DRI), una herramienta petrográfica microscópica y semicuantitativa, también ha demostrado ser eficaz para la evaluación de RAA (Martin et al., 2017), y con base en análisis con varios agregados reactivos, se diseñó un modelo cuantitativo. desarrollado para esta evaluación (Sánchez et al., 2015b y Sánchez et al., 2016b).

Además, los estudios que evalúan la confiabilidad y comparan los ensayos de expansión en barras de mortero y los ensayos de campo, indican que el método acelerado en mortero, a pesar de usarse hace más de 15 años en todo el mundo, aún necesita de calibración para poder transponer o acercarse a la realidad de la estructuras, para todo tipo de áridos y ligantes, ya que pueden presentar resultados falsos negativos y falsos positivos. Además, se deben considerar parámetros como la temperatura, el pH y la concentración de álcali en la solución de exposición que influyen en el desempeño de las pruebas (Jason et al., 2010; Lindgard et al., 2012; Lindgard et al., 2016).

En cuanto a las pruebas de reactividad de los áridos, los estudios indican que cuanto más finas son las partículas y mayor la temperatura, mayor y más rápida es la liberación de álcalis. Además, la activación térmica tiene el mayor efecto sobre el gneis y un efecto menor y similar sobre el granito y el feldespato (Lu et al., 2006a, Lindgard et al., 2013a y 2013b). También se observó que durante el ensayo en barras de mortero, más álcalis son liberados en las soluciones (con NaOH y KOH), en comparación con la solución saturada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Berubè et al., 2002).

Berubé et al. (2003a), Rivard et al. (2007) y Shehata et al. (2010) investigaron los efectos del contenido alcalino en el cemento y verificaron que el mismo tiene un efecto significativo en la expansión de los prismas y morteros de concreto, y depende de la proporción y el agregado utilizado. Además, Berubè et al. (2003b) indicaron que los hormigones bajos en álcali son una buena opción para condiciones de exposición marina o sales de deshielo.

Para mitigar los efectos de AAR en el concreto, los investigadores evaluaron el efecto de las adiciones minerales al mismo y encontraron que la presencia de algunas adiciones reduce significativamente las expansiones generadas por AAR (Duchesne y Berubè, 2001; Grattan-Bellew et al., 2003). Otros estudios muestran que las mezclas de cemento y humo de sílice no fueron eficientes en la retención de álcalis en sus productos de hidratación, sin embargo, las mezclas de cemento con humo de sílice y cenizas volantes tienen la capacidad de aglomerar y retener álcalis (Shehata et al., 2000; Shehata et al. , 2002 y Shehata et al., 2006, Xue et al., 2021, Andrade Neto et al., 2021).

Skolu et al. (2007) y Feng et al. (2010) investigaron la influencia del nitrato de litio en las expansiones en morteros y hormigones. Los resultados obtenidos indicaron que la sal de litio redujo la ocurrencia de expansiones por formación de etringita tardía, formando una barrera protectora que evita que la sílice reactiva sea atacada por los álcalis.

Munhoz et al. (2021) evaluaron el efecto de la autocuración del mortero autógeno mejorado en la reacción álcali-árido (RAA). Los resultados mostraron que el mortero de referencia y la mezcla con 1% de microfibras de polipropileno presentaron los niveles más altos y más bajos de expansión, respectivamente.

Los temas desarrollados por investigadores brasileños tratan sobre la investigación de las características de los materiales que influyen en el desarrollo de RAA (Tiecher et al., 2012; Tiecher

et al., 2017), así como la caracterización del gel producido por RAA (Johnson et al., 2017), la investigación de obras con indicios de AAR (Hasparyk et al., 2009; Prado et al., 2019) y el análisis del comportamiento de nuevos materiales sometidos a RAA (de Carvalho et al., 2009).

Tiecher et al. (2012) estudiaron el material de mesostasis presente en los intersticios de rocas volcánicas, con resultados que indicaron que la mesostasis en los intersticiales de rocas volcánicas generalmente consiste en fases minerales microcristalinas a criptocristalinas de cuarzo, feldespato y arcilla. Se ha identificado que la mesostasis tiene características diferentes y, por lo tanto, esta nueva caracterización exige una reevaluación de su influencia en la reactividad de las rocas volcánicas. Tiecher et al. (2017) presentaron una investigación sobre la influencia de la deformación del cuarzo en los agregados en el desarrollo de la reacción álcali-sílice en el concreto y su relación con la disolución de la sílice. Los resultados indicaron que la presencia de cuarzo ligeramente deformado indica la presencia de vías internas disponibles para reaccionar con soluciones alcalinas en los poros del hormigón y apunta al desarrollo potencial de una reacción álcali-sílice. A través del ensayo del espectrofotómetro visible se pudo evaluar el potencial de disolución de diferentes muestras de cuarzo deformado, lo que confirmó que la reactividad del cuarzo aumenta a medida que aumenta la deformación de la estructura cristalina.

Johnson et al. (2017) evaluaron las propiedades de fractura del gel producido por la reacción álcali-sílice en concreto. Los investigadores utilizaron la técnica de microscopía electrónica de escaneo y un modelo de mecánica de fractura, y estimaron que la energía de fractura del gel es de $G_f = 11,2 \text{ J/m}^2$.

En la Usina Hidroeléctrica de Furnas, Brasil, ya identificada con la presencia de RAA, Hasparik et al. (2009), investigó las propiedades del hormigón afectado. Los resultados ultrasónicos mostraron que la velocidad del pulso es sensible a diferentes grados de deterioro debido a RAA y se correlaciona con el módulo de elasticidad de los hormigones investigados. Además, el módulo de elasticidad fue la principal propiedad afectada por el RAA.

Ya Carvalho et al. (2009) investigaron el efecto del uso de fibras de acero en morteros sometidos a RAA. Los resultados mostraron que la adición de fibras de acero redujo la expansión por RAA. El beneficio más expresivo correspondió a la adición de fibras de 13,0 mm en la mezcla que contenía 2% de fibras.

La mayoría de los trabajos (13 artículos) están relacionados con metodologías para evaluar el daño causado por reacciones álcali-árido. Esto se refiere a los intentos de estandarizar las pruebas utilizadas a nivel mundial y la correlación entre los métodos acelerados y de campo (Lindgard et al., 2016). Además, la mayoría de estas investigaciones fueron dirigidas por el grupo de investigación canadiense de Fournier, con importantes contribuciones del brasileño Sánchez, profesor de la Universidad de Ottawa.

Las investigaciones relacionadas con el uso de puzolanas suman 10 trabajos, mientras que los temas reactividad de los agregados y alcalinidad del cemento Portland presentan proporciones de estudios similares, 7 y 6, respectivamente.

3.2 Métodos de ensayos

Analizar con precisión muestras de hormigón y mortero sujetas a RAA proporciona fiabilidad y seguridad en relación a las condiciones de uso de determinados materiales en estructuras de hormigón armado. Así, la estandarización de los métodos de ensayos permite comparar de forma eficiente las condiciones de las pruebas aceleradas y de campo, con el objetivo de simular la realidad con mayor precisión. Además, comprender cuánto ha afectado o afectará su desempeño el deterioro de las estructuras existentes es otra dificultad que debe dominarse en el campo de investigación de la reacción álcali-árido.

En este contexto, a continuación se presentan los principales métodos de evaluación para el diagnóstico de RAA, así como el grado de deterioro del hormigón como consecuencia de la expansión generada.

3.2.1 Análisis petrográfico

El análisis petrográfico se utiliza para identificar y clasificar los áridos según sus características mineralógicas, estructurales y químicas, con el fin de determinar su posible potencial reactivo.

Con base en el análisis petrográfico de la roca, es posible clasificar el agregado según el RAA en: potencialmente inocuo o potencialmente reactivo. Los límites máximos de fases reactivas generalmente adoptados para clasificar un árido como potencialmente inocuo son: 5% (cuarzo nocivo), 3% (calcedonia), 1% (tridimita o cristobalita), 3% (vidrio volcánico) y 0,5% (ópalo) . Sin embargo, con base en la experiencia del petrógrafo, así como a las características presentes, se pueden admitir límites ligeramente diferentes. En Brasil, la norma que establece un método para realizar análisis petrográficos de muestras representativas de rocas para uso como agregados en concreto, con énfasis en los factores condicionantes para la ocurrencia de la reacción álcali-agregado (RAA) es la NBR 15577 (2018) parte 3.

En las últimas décadas, los investigadores han buscado desarrollar esta técnica, aumentando los procedimientos de evaluación diagnóstica y el potencial de expansión en estructuras sujetas al desarrollo de RAA (Sanchez et al., 2015). En este contexto, se desarrollaron varios métodos petrográficos (Blight et al., 1981; Sims y Miglio, 1992, Salomon y Panetier, 1994; Clemena et al., 2000; Rivard et al., 2000; Broekmans, 2002; Lindgard et al. . , 2004) a nivel mundial, pero el más utilizado es el Damage Rating Index (DRI), mejorado por Grattan-Bellew y colaboradores (Grattan-Bellew y Danay, 1992; Dunbar y Grattan-Bellew, 1995; Grattan-Bellew y colaboradores). Mitchell, 2006; Sánchez, 2014).

En 2017, se publicó un trabajo de colaboración Brasil-Canadá (Sanchez et al., 2017) para difundir la evaluación RAA por el Damage Rating Index (DRI), que es un hito importante para la inserción del método en Brasil. Actualmente, la prueba Damage Rating Index (DRI) está registrada como Instrucción Técnica de FURNAS, de la autoría de los renombrados investigadores brasileños Nicole Hasparyk y Leandro Sánchez (Hasparyk y Sánchez, 2021). Este hecho es un gran avance, por lo que la investigación brasileña debería comenzar a utilizar esta técnica con mayor frecuencia para investigar RAA y otras reacciones expansivas.

3.2.2 Damage Rating Index (DRI)

La técnica Damage Rating Index (DRI) es un análisis petrográfico semicuantitativo realizado con la ayuda de un estereomicroscopio con aumentos de 15 a 16x (Figura 3), donde se contabilizan las características de deterioro de las muestras a través de pequeñas áreas con dimensiones de 1 cm x 1 cm marcado en la superficie pulida de la muestra (Grattan-Bellew, 1995; Villeneuve et al., 2012). Es importante señalar que además de la cuantificación de las fisuras encontradas, también se identifican sus características petrográficas (Figura 3 y Tabla 1), las cuales se multiplican por factores importantes, buscando equilibrar la influencia de los tipos de fisuras en relación con el impacto resultante en pérdidas de propiedades mecánicas (Tabla 1) (Sanchez et al., 2015). El número obtenido por el DRI se normaliza a un área de 100 cm² (Villeneuve, 2011; Sanchez, 2014; Waidner, 2016; Sanchez et al., 2017).

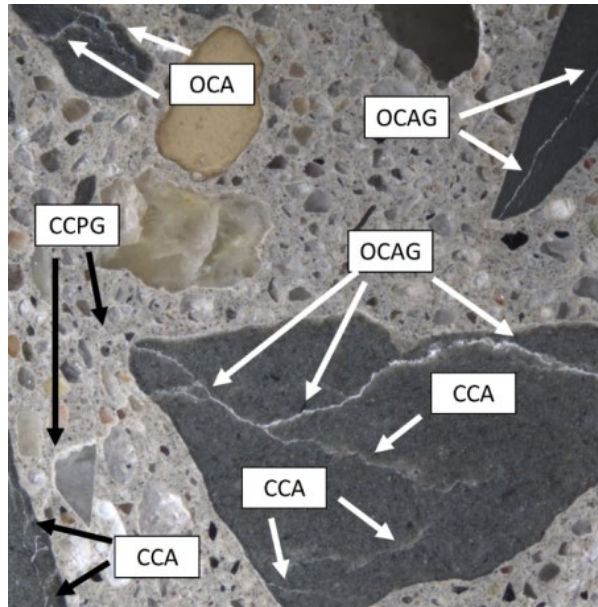


Figura 3. Imagen de la técnica Damage Rating Index (DRI) realizada en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Universidad Federal de Paraná (LaME-UFPR).

Tabla 1. Características ponderadas para el análisis de DRI.

Características petrográficas	Abreviación	Peso	Grupo
Fisuras cerradas en la partícula de árido	CCA	0,25	I
Fisuras abiertas en la partícula de árido	OCA	2,00	II
Fisuras en la partícula de árido y con presencia de gel	OCAG	2,00	II
Partícula de árido desagregado	CAD	3,00	-
Partícula de árido desagregada/destrozado	DAP	2,00	II
Fisuras en la pasta de cemento	CCP	3,00	III
Fisuras en la pasta de cemento y con presencia de gel	CCPG	3,00	III

Clasificación del grupo:

Grupo I: fisuras cerradas (abertura $\leq 0,1$ mm) en partículas de árido grueso o en la fracción gruesa de partículas de arena (1 a 5 mm) (CCA);

Grupo II: fisuras abiertas (apertura $\geq 0,1$ mm) en las partículas de árido grueso o en la fracción gruesa de

partículas de arena (1 a 5 mm), con o sin productos de reacción (OCA + OCAG);

Grupo III: fisuras en la pasta de cemento, con o sin productos de reacción (CCP + CCPG) (Sanchez et al., 2015) adaptado de (Villeneuve, 2011).

El método propone la clasificación de las fisuras en grupos. El grupo I presenta gran variabilidad en el número de fisuras según el árido utilizado, presentando valores proporcionales al aumento de la expansión. Sin embargo, cabe señalar que el proceso de trituración de áridos también provoca variaciones en los resultados, ya que la energía aplicada en el proceso puede dar lugar a la formación de pequeñas fisuras en el interior de las partículas de árido. Por otro lado, los grupos II y III presentan grietas abiertas que tienden a propagarse hacia la zona de transición del agregado con la pasta de cemento. Además de las formas de aparición de las fisuras, es interesante añadir que la densidad y cantidad de las mismas por cm^2 , siguen la tendencia creciente debido al desarrollo de la expansión de las muestras de hormigón (Sanchez et al., 2015).

Con base en las diversas observaciones de DRI, Sánchez et al. (2015) propusieron un modelo interesante que relaciona la expansión del concreto con el desarrollo de grietas generadas por RAA,

como se muestra en la Figura 4 y se ejemplifica a continuación. Al inicio de la reacción físico-química (expansiones del hormigón inferiores a 0,05%), es común encontrar fisuras provocadas por RAA, tipo A o B, dentro de las partículas de árido reactivo. A medida que la expansión avanza a niveles moderados (aproximadamente 0,12%), continúan desarrollándose nuevas grietas dentro de las partículas reactivas. En paralelo, las grietas preexistentes continúan desarrollándose, las cuales logran atravesar la zona de transición y avanzar hacia la pasta de cemento. Para altos niveles de expansión (aproximadamente 0,20%), la mayoría de las grietas previamente formadas en los agregados tienden a encontrarse ya propagadas dentro de la pasta de cemento. Además, en esta etapa de deterioro, la “ley de mínima energía” tiende a regir la progresión de la fisura. En otras palabras, existe una mayor tendencia a que las grietas existentes continúen propagándose, en lugar de una generación y aparición continua de nuevas grietas. Finalmente, a niveles muy altos de expansión (igual o superior al 0,30%), el cuadro de fisuración se aprecia muy intenso, ya que existe una tendencia a la interconexión entre las fisuras formadas en las diferentes partículas del árido. En este punto, vale la pena señalar que las propiedades mecánicas del hormigón se ven extremadamente reducidas y afectadas, especialmente la resistencia a la compresión del hormigón.

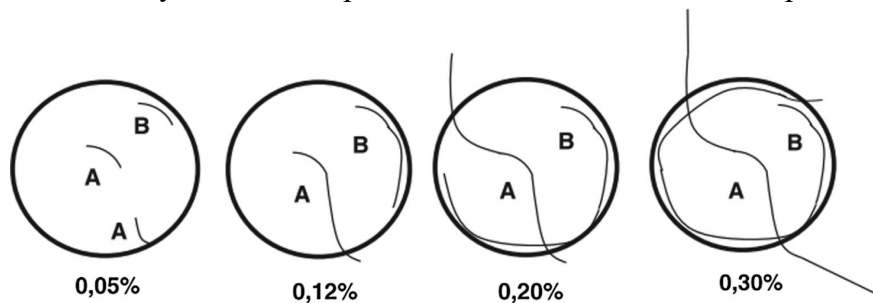


Figura 4. Modelo cualitativo de daño por RAA versus niveles de expansión (Sanchez et al., 2015).

3.2.3 Stiffness Damage Test (SDT)

El método SDT fue desarrollado inicialmente por Walsh (1965), el autor detectó una correlación interesante entre la densidad de agrietamiento interno de las muestras de roca y el comportamiento tensión/deformación proporcionado por su carga cíclica. A principios de la década de 1990, una investigación dirigida por Crouch, se propuso el uso de SDT para la evaluación de muestras de hormigón afectadas por la reacción álcali-árido. Como resultado, Chrisp et al. (1993) predijeron la aplicación de una carga cíclica fija (cinco ciclos), de 0 a 5,5 MPa, a razón de 0,10 MPa/s.

Los autores indican que el módulo de elasticidad y el área de histéresis (J/m^3) son buenos parámetros para verificar la RAA, además de no ser una prueba destructiva, y poder reutilizar las muestras en otros análisis. Los resultados muestran que el módulo de elasticidad disminuye, mientras que el área de histéresis aumenta debido a la deformación plástica que se genera cuando se aplica la carga cíclica (Smaoui et al., 2004a).

Este método ya ha sido estudiado por varios autores, que tenían como objetivo identificar las características del ensayo que influyeron en los resultados (Smaoui et al., 2004a; Sanchez et al. 2014; Sanchez et al. 2015; Sanchez et al. 2017a; Sanchez et al. , 2017b). Smaoui et al. (2004a) probaron otras tasas de aplicación de carga como máxima, 5, 10 y 15 MPa, por lo que la carga de 10 MPa mostró los mejores resultados en general.

Sánchez et al. (2014a), Sánchez et al. (2015a), Sánchez et al. (2017) estudiaron la aplicación de las técnicas en diversas mezclas de concreto con diferentes agregados y también en testimonios extraídos de estructuras afectadas por RAA. Los resultados mostraron que el uso de una carga de aplicación del 40% de la resistencia del concreto a los 28 días mostró un mejor desempeño para diagnosticar el grado de daño provocado por la RAA.

Sánchez et al. (2016a y 2017) indican una buena correlación entre los ensayos STD y DRI, ya que ambas pruebas miden el daño causado por RAA de manera similar y pueden complementarse y mostrar las mismas tendencias en relación con la expansión.

Los números SDT expresan las características mecánicas del hormigón, es decir, a medida que las expansiones provocadas por la RAA avanzan, también aumentan las fisuras, disminuyendo su módulo de elasticidad y resistencia a la tracción (Sanchez et al., 2017). La Figura 5(a) muestra el ensayo SDT siendo realizado en el LaME-UFPR, mientras que la Figura 5b muestra un resultado de salida del propio SDT, donde se identifican los parámetros denominados Stiffness Damage Index (SDI) e Stiffness Damage Index, los cuales se traducen como la relación entre la energía disipada y la energía total aplicada a la muestra, así como la relación entre la deformación plástica y la deformación total aplicada al sistema, respectivamente. Finalmente, el módulo de elasticidad así como el índice no lineal (NLI) también se pueden obtener de la prueba.

En Brasil, esta técnica de evaluación fue publicada por Sanchez et al. (2017) en una colaboración Brasil-Canadá y, actualmente, el Stiffness Damage Test (SDT) está registrada como documento de Instrucción Técnica por FURNAS (Hasparyk y Sánchez, 2021). Este es otro avance nacional, de manera que las investigaciones brasileñas deben aplicar el SDT con mayor frecuencia en trabajos investigativos sobre reacciones expansivas en el hormigón.

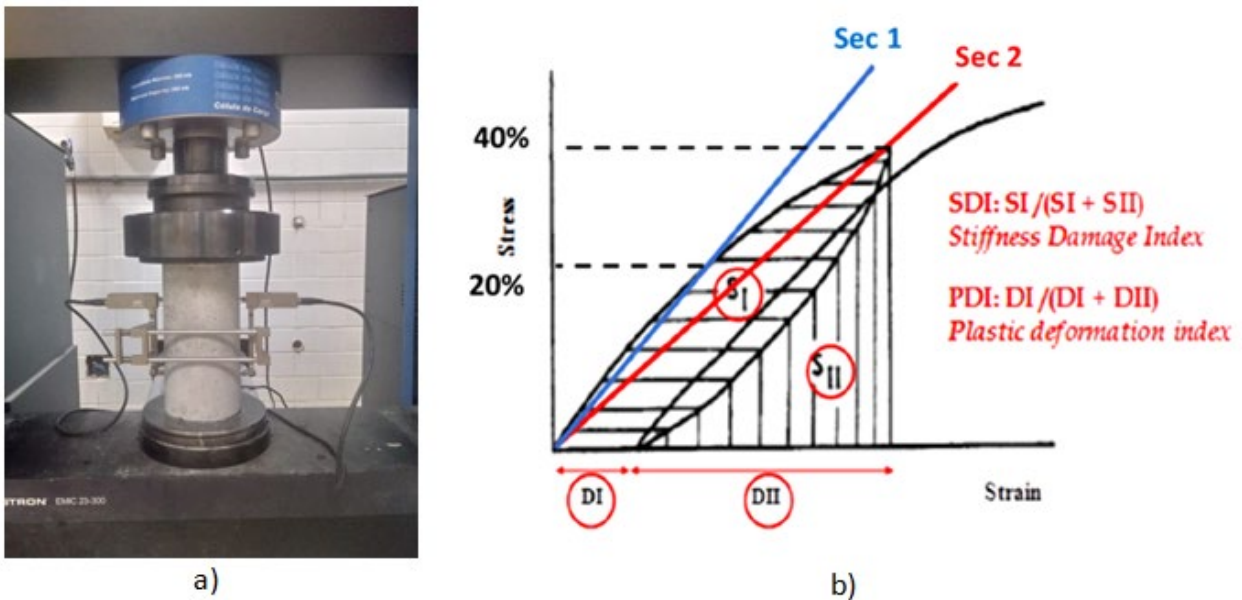


Figura 5. a) realización del ensayo SDT en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Universidad Federal de Paraná (LaME-UFPR); b) comportamiento tensión-deformación para muestras de hormigón afectadas por RAA (Sanchez et al., 2017).

3.2.4 Método acelerado de las barras de mortero

El ensayo acelerado de barra de mortero se conoce en la literatura como AMBT (accelerated mortar bar test). En Brasil, esta ensayo está estandarizado por la NBR 15577: 2018 – parte 4 y en Canadá por la CSA A23.2-25A.

Es una de los ensayos más difundidas en el mundo y consiste en evaluar la variación en la longitud de las barras de mortero con el fin de verificar una potencial expansión debido a la ocurrencia de la reacción del árido alcalino en un corto período de tiempo (16 y 30 días en el caso de la NBR 15577:2018 – parte 4 y 14 días en el caso de la CSA A23.2-25A). Por tratarse de un ensayo acelerado, se produce en condiciones severas de exposición (alta temperatura, 80°C e inmersión en una solución alcalina de NaOH 1N), lo que genera diversas críticas en cuanto a su uso y variaciones en los resultados.

La Figura 6(a) muestra los prismas de mortero que se someten al ensayo de expansión por RAA y la Figura 6b muestra la medida de la variación dimensional que siendo realizada en el ensayo AMBT.

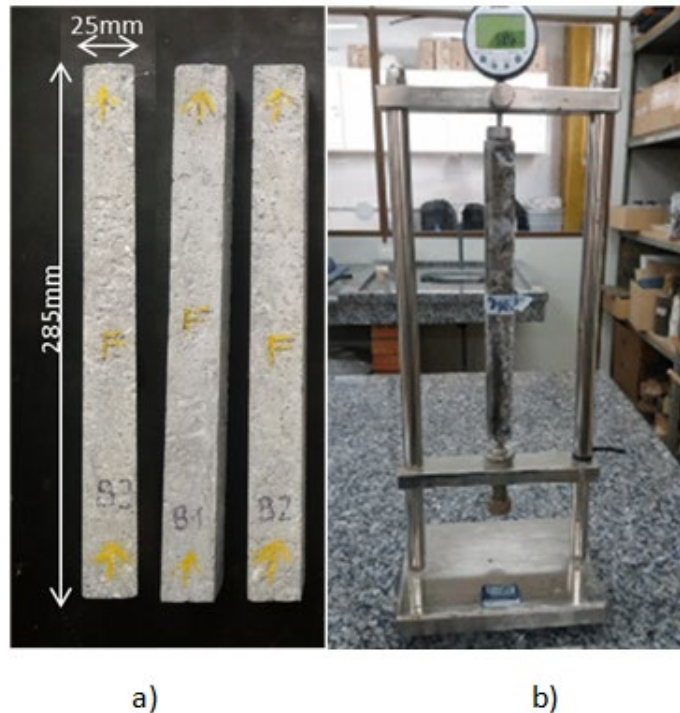


Figura 6. a) prismas de mortero para el ensayo de expansión, b) ensayo de expansión del mortero.

Varios autores utilizan este método para evaluar la reactividad en agregados (Fournier y Bérubé, 2000; Thomas et al., 2006; Alaejos et al., 2014; Golmakani; Hooton, 2016) e indican que puede generar resultados falsos positivos y falsos negativos. Los áridos que dan como resultado falsos negativos inicialmente pueden parecer inofensivos pero con el tiempo tienen un potencial reactivo. Y también es posible obtener resultados que descartan áridos que pueden usarse en hormigón sin dañar el material, pero el ensayo de AMBT genera falsos positivos.

Varios investigadores buscan mejorar el método AMBT para remediar los problemas existentes (Shon et al., 2002; Thomas et al., 2006; Sanchez et al., 2011; Alaejos et al., 2014), pero sigue siendo un ensayo muy criticado por sus drásticas condiciones de aceleración de expansiones por RAA, como reportan (Thomas et al., 2006; Alaejos et al., 2014; Golmakani; Hooton, 2016; Fournier; Bérubé, 2000).

3.2.5 Método de los prismas de hormigón

El ensayo de prismas de hormigón o en inglés Concrete Prism Test (CPT) generalmente es considerado como el mejor indicador del desempeño en campo cuando se estudia la reacción álido-álcali, y consiste en medir expansiones de prismas de hormigón sometidos a un ambiente de alta humedad (95%) a una temperatura de 38^oC. Sin embargo, requiere un período de evaluación de un año para estudios de reactividad de agregados y de dos años para el uso de materiales mitigadores de la reacción (Ideker et al., 2010). El hecho de que solo genere resultados a largo plazo es una de las razones por las que muchos estudios y empresas no suelen seguir este método de ensayo, a pesar de que se considera más adecuado que el método AMBT (accelerated mortar bar test). La figura 7(a) muestra los prismas de hormigón utilizados para el ensayo de expansión y la Figura 7(b) muestra el ensayo en curso.

En Brasil, la NBR 15577-6 (2018) establece los procedimientos necesarios para la evaluación de la RAA en prismas de hormigón. Esta norma es indicada para determinar el potencial reactivo de los áridos en comparación con hormigón con cemento estándar, con adición suplementaria de hidróxido de sodio, por un período de 365 días. En cuanto a la evaluación de materiales complementarios o inhibidores de RAA, el período de investigación se extiende a lo largo de 2 años.

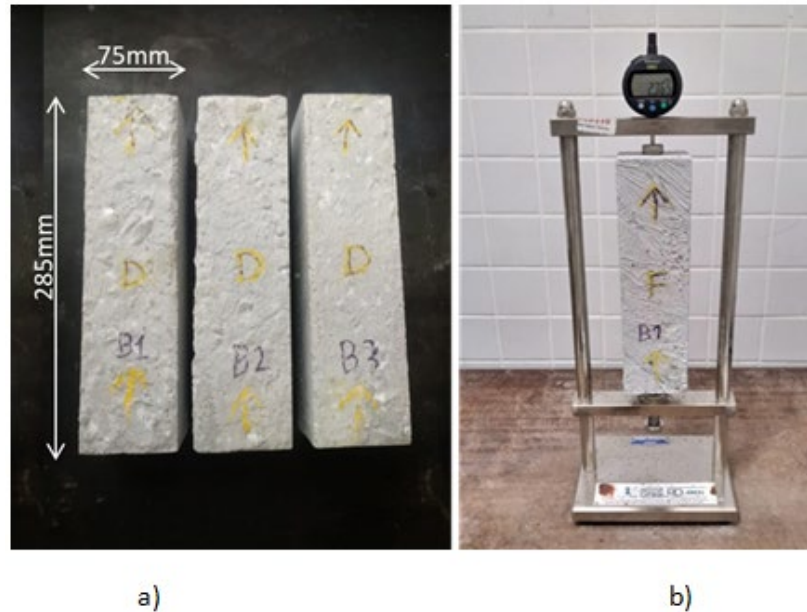


Figura 7. a) Prismas de hormigón para ensayo de expansión, b) Ensayo de expansión de prismas de hormigón.

Cabe señalar que, aunque se considera que el CPT es el procedimiento de ensayo más confiable disponible, una de las principales desventajas del método es su largo período de duración (1-2 años). En un intento por resolver este problema, en la década de 1990 se propusieron procedimientos acelerados de CPT (Ranc y Debray, 1992). Entre ellos se destacó una versión acelerada de CPT (es decir, ACPT) realizada a 60 °C, que mostró resultados prometedores en todo el mundo. Se encontró que se pueden lograr resultados confiables dentro de 3 a 4 meses, o de 6 a 8 meses para evaluar la reactividad potencial de los agregados, o la eficiencia de las medidas preventivas, respectivamente.

Este método ha sido estandarizado en Europa por la RILEM (Lindgård, 2011), aunque en América del Norte y del Sur actualmente no es un ensayo estandarizado, porque se han observado algunos problemas relacionados con la lixiviación alcalina y una importante variabilidad en los resultados de los ensayos (Kermit, 2017).

La literatura también sugiere un período de prueba de 3 meses para el método ACPT, para determinar la reactividad de los agregados (Degrosbois y Fontaine, 2000; Touma et al., 2001; Fournier et al., 2004) y seis meses para la determinación de efectividad de los materiales de cementación suplementarios (Touma et al., 2001). En Brasil, la NBR 15577-7 (2018) indica el uso de pruebas aceleradas de prisma de hormigón (ACPT), e establece una temperatura de 60°C por un período de 140 días con humedad superior a 95%.

Cabe mencionar que Sanchez (2008) y Sanchez, Kuperman y Helene (2011) estudiaron otro método acelerado con el objetivo de reducir los problemas por lixiviación que existen en el método ACPT y buscar un equilibrio entre el ambiente interno (muestra de ensayo) y la externa (solución en la que se sumergen los prismas), es decir, se utiliza una solución con menos NaOH, a una temperatura de 80°C y se lleva a cabo durante un periodo de cuatro semanas. Se llama prueba

acelerada del prisma de hormigón brasileño (ABCPT). Los resultados obtenidos con este método fueron satisfactorios en comparación con el CPT (89% de correlación).

3.2.6 Comparación entre los métodos de evaluación de la expansión por RAA

Como se identificaron muchos ensayos para investigar la RAA, algunos estandarizadas y otros no, algunos más consistentes con las condiciones de campo y otros no, en esta sección optamos por mostrar una descripción general de la frecuencia de uso de los métodos de ensayos considerados entre los años 2000 y 2022. En este contexto, la Figura 8 presenta una comparación de la frecuencia de uso de los tipos de métodos de monitoreo de expansión aplicados para evaluar el RAA. La recopilación se realizó a partir de la búsqueda sistemática de estudios publicados en las bases de datos WoS y SCOPUS desde el año 2000 en adelante, con más de 5 citas de ambos países (Brasil y Canadá).

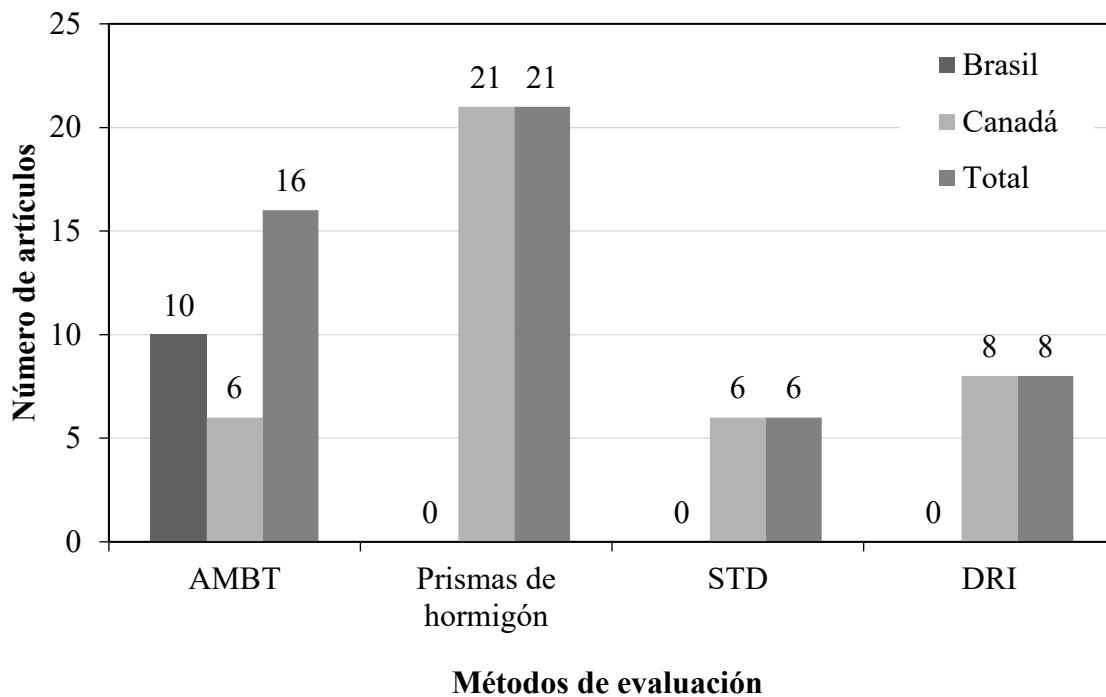


Figura 8. Métodos de evaluación de la expansión provocada por RAA aplicados en las investigaciones en Canadá y Brasil.

Se observa que el método acelerado de barras de mortero (AMBT) es el que predomina en los estudios relacionados con RAA en Brasil. Cabe señalar también que, en Brasil, los otros métodos (prismas de hormigón, SDT y DRI) no fueron utilizados en los artículos consultados en la recopilación realizada para esta investigación. Este hecho se explica por el tiempo y la facilidad de ejecución del AMBT (resultados en 4 semanas) en comparación con los prismas de hormigón (resultados en 1 a 2 años). Vale la pena mencionar que esta investigación no considera revistas brasileñas con gran relevancia en el país, por lo que los trabajos que utilizan otros métodos de evaluación pueden haber sido publicados a nivel nacional. En este contexto, son importantes la publicación de Sánchez et al. (2017) y el Instructivo Técnico de FURNAS (Hasparyk y Sanchez, 2021). Trabajos recientes son los que deberán hacer que estos métodos de evaluación de daños por RAA sean más aplicados en investigaciones realizadas en Brasil.

Siendo así, el poco uso de los análisis STD y DRI se debe al poco conocimiento y difusión relacionada a ellos en Brasil. Además, son métodos para evaluar el estado de deterioro en prismas de hormigón que no fueron encontrados en los artículos del levantamiento de esta investigación, estando los trabajos de investigación brasileños, que han sido publicados, basados únicamente en morteros (ensayo AMBT).

En cambio, en Canadá, el ensayo de prismas de hormigón se utiliza con más frecuencia que en Brasil. La Figura 8 también muestra que el SDT y el DRI son herramientas de uso frecuente para medir el alcance del daño causado por RAA en Canadá. El uso frecuente de estos métodos (prueba de prisma de hormigón - CPT, SDT y DRI) en la investigación en Canadá se basa en el hecho de que el AMBT tiene una confiabilidad dudosa. Además, el SDT y el DRI son útiles para comprender el deterioro actual del concreto por RAA y determinar si la expansión por RAA ha afectado la estructura del concreto y sus propiedades mecánicas.

3.3 Paronama de las investigaciones de RAA en Brasil

En Brasil, los primeros estudios registrados que abordaron el problema de la RAA ocurrieron en 1963, cuando se realizó la caracterización de los agregados que serían utilizados en la construcción de la represa de Jupuíá, entre los estados de São Paulo y Mato Grosso do Sul. El estudio fue realizado por Gitahy y Ruiz en sociedad con el IPT – Instituto de Pesquisa y Tecnología, y Centrais Elétricas de Urubupungá S.A. y encontró que los agregados tenían elementos reactivos en su composición que podían reaccionar como los álcalis presentes en el cemento, como había publicado Stanton en 1940 (Lima, 2009; Prizskulnik, 2005).

Según Hasparyk (2005), desde el descubrimiento de RAA, varios estudios se han enfocado en comprender el proceso químico y la caracterización de los minerales reactivos, así como las causas y consecuencias en las obras afectadas por este proceso de deterioro. Haspariryk (2005) indicó que al menos 19 represas en Brasil fueron identificadas con signos de RAA, lo que compromete la durabilidad de las estructuras, además del impacto en la economía del país causado por el mal funcionamiento o suspensión de actividades.

En cuanto a la caracterización de materiales, datos recogidos por la Asociación Brasileña de Cemento Portland (ABCP) en 2015, indican que de los áridos ya analizados, el 36% tiene potencial reactivo. Además, el número de empresas de construcción civil que buscan analizar los materiales utilizados en sus obras viene aumentando cada año, donde la mayoría de las solicitudes se refieren a los estados de São Paulo y Pernambuco (Battagin et al., 2016).

En el estado de Pernambuco, en 2004 se marcó un marco con relación al RAA en Brasil, se realizó la primera prueba nacional de RAA en edificaciones. Ocurrió en la Región Metropolitana de Recife (RMR), estado de Pernambuco, con la investigación pericial del derrumbe del edificio residencial Areia Branca. Las grietas por RAA se concentraron en los bloques de cimentación del edificio Areia Branca, pero vale la pena señalar que el edificio no colapsó debido al proceso de deterioro causado por RAA (Silva et al., 2021). En los años siguientes, con labores de inspección dirigidas por el Dr. Tibério Andrade, profesor de la Universidad Federal de Pernambuco (UFPE), varios edificios residenciales fueron encontrados con bloques de cimentación agrietados por RAA. Estos hechos generaron discusiones muy importantes para el medio técnico y científico, por lo que surgieron procedimientos de inspección y métodos de recuperación desarrollados específicamente para la solución de estos casos.

La creciente preocupación por el tema ha aumentado el número de estudios relacionados con RAA en Brasil. La Figura 9 muestra el crecimiento de las publicaciones brasileñas relacionadas con el tema en revistas de alto impacto, en las bases de datos WoS y Scopus.

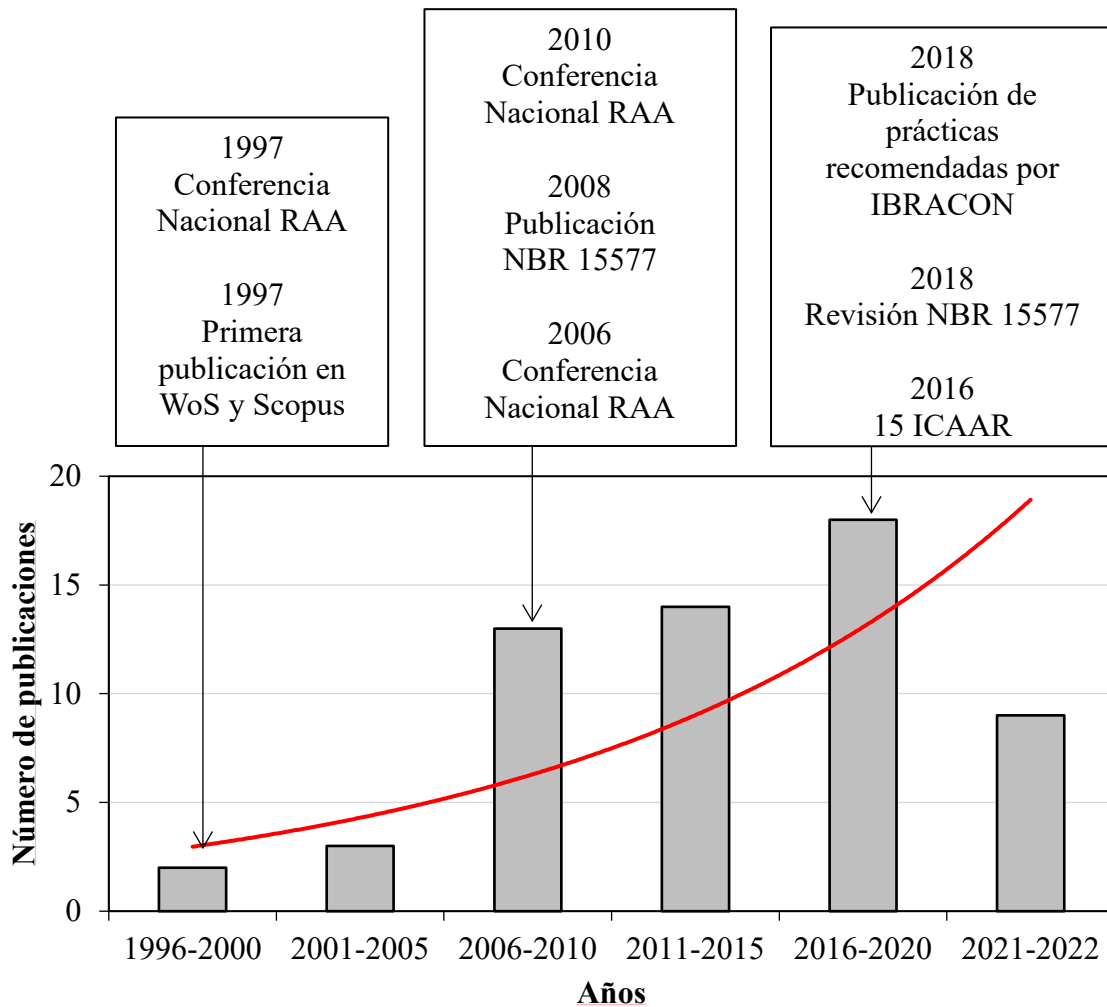


Figura 9. Crecimiento de publicaciones relacionadas con RAA en Brasil en revistas de alto impacto presentes en las bases de datos WoS y Scopus.

En la Figura 9 se puede ver que las publicaciones relacionadas con RAA en Brasil, además de haber aumentado con los años, muestran un salto a partir de 2007. Este hecho coincide con los estudios desarrollados para la publicación de la norma reguladora brasileña en 2008, NBR 15577, que se divide en 7 partes y se refiere a los procedimientos de ensayo para la caracterización de áridos y ligantes sujetos a RAA. Esta norma fue revisada y actualizada en 2018.

Concomitantemente con la publicación de la NBR 15577:2018, en 2018 fue lanzada la Guía de Prevención de la Reacción Alcali-Árido – Prácticas Recomendadas por IBRACON (Instituto Brasileño del Concreto). El trabajo fue desarrollado por el Comité Técnico de Reacción Alcali-Árido del IBRACON, con la coordinación de los investigadores Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Quitete y Arnaldo Battagin.

En cuanto a la actuación de Brasil como sede y organización de eventos en el campo de la investigación sobre RAA, en 1997 se realizó el 1º Simposio sobre Reactividad álcali-áridos en estructuras de hormigón, que fue un incentivo histórico para la investigación brasileña sobre RAA. Cabe señalar que 1997 también coincide con los primeros registros de investigaciones brasileñas (publicación de artículos) en bases de datos internacionales, como se puede ver en la Figura 9.

En 2006, se realizó el II Simposio sobre Reacción álcali-áridos en estructuras de hormigón, momento en que Brasil ya estaba en un nivel superior en la investigación sobre RAA, y la constatación de la reacción en los bloques de cimentación en edificios en Pernambuco estaba en

evidencia en Brasil. Cabe señalar que poco después de este evento, Brasil lanzó su primera norma sobre RAA, la mencionada NBR 15577/2008. También se debe notar en la Figura 9 que la participación de investigadores brasileños en publicaciones en revistas nacionales de alto impacto creció mucho después del II Simposio sobre Reacción álcali-áridos en estructuras de hormigón.

En 2016, ocurrió otro hito brasileño en la investigación sobre RAA, Brasil fue sede de la 15^{ta} Conferencia internacional sobre reacción álcali-árido (15th ICAAR), considerada la conferencia más importante del mundo sobre investigación y desarrollo en RAA. Este es un mérito de los investigadores nacionales y de los editores de los anales de este evento, Dr. Haroldo de Mayo Bernardes y Dr. Nicole Pagan Hasparyk. La Figura 9 también muestra un aumento en la participación de brasileños en la publicación de artículos en revistas de alto impacto a partir de 2016, cuando se realizó el ICAAR en São Paulo, Brasil.

Por lo tanto, es evidente que Brasil juega un papel global importante en el avance de la investigación relacionada con RAA, participando y fomentando discusiones nacionales e internacionales proporcionadas por sus especialistas que discuten conocimientos en comités específicos sobre el tema.

3.4 Enfoques futuros y lagunas de conocimiento

Las publicaciones de los últimos tres años en Brasil y Canadá, referentes al tema investigado, suman 19 artículos. Con estos trabajos se realizó un análisis de acoplamiento bibliográfico, el cual mide la relación entre dos artículos a partir del número de referencias comunes citadas (correlaciones), con el fin de definir áreas de investigación similares y en auge, tal como lo indica el trabajo de Lucas, García-Zorita, y Sanz-Casado (2013).

De estos 19 artículos, se seleccionaron aquellos con al menos dos citas de las dos bases de datos en estudio y se correlacionaron los temas de investigación entre ellos, estos trabajos se presentan en la Tabla 2.

Entre los trabajos presentados, se pueden observar dos grandes grupos de investigación, que se relacionan según los temas estudiados. El mayor grupo identificado se refiere al estudio de las reacciones álcali-árido en general, así como sus implicaciones para las estructuras de hormigón armado. Dentro de este grupo se encuentran los trabajos de Campos et al. (2018) y Gorga et al. (2018) con 21 y 26 correlaciones, respectivamente. Este grupo indica que el tema relacionado con la RAA sigue en aumento, así como los diversos parámetros relacionados con los ensayos y las formas de deterioro observadas con intentos de modelar el comportamiento del hormigón afectado con RAA. Es importante resaltar que los dos trabajos citados como destacados en este grupo, Campos et al. (2018) y Gorga et al. (2018), presentan a investigadores brasileños como primeros autores.

El otro grupo está representado por los trabajos de Angulo-Ramírez et al. (2018) con tres correlaciones y Tiecher et al. (2018), con 5 correlaciones. Estos artículos se refieren a las reacciones álcali-árido en sistemas cementicios alternativos, como los cementos activados con álcali y el uso de adiciones puzolánicas. Este grupo de estudio busca una mejor comprensión de la durabilidad de los cementos con bajo contenido de clinker, y lo ve como un tema de más originalidad con poca bibliografía disponible hasta el momento y que deberá profundizarse en los próximos años. Estos dos trabajos también presentan la actuación de los brasileños en el desarrollo de la investigación, lo que muestra la participación de Brasil en la vanguardia de la investigación sobre RAA.

En general, los trabajos relacionados con RAA se ocupan principalmente de la caracterización de materiales, formas de mitigación de RAA, métodos de evaluación e identificación de obras con una reacción deletérea. A pesar de que el tema es reciente y la mayoría de los trabajos se refieren a las implicaciones de RAA en estructuras de hormigón, entre los vacíos de conocimiento sobre el tema se puede mencionar el estudio de los mecanismos de reacción en agregados de origen volcánico e ígneo dolomítico, así como la caracterización de RAA en cementos alternativos. Además, se debe

dar énfasis al desarrollo de metodologías para recuperar o contener los efectos causados por la RAA.

Tabla 2. Análisis de correlación entre los temas estudiados con respecto a la RAA, en Canadá y Brasil.

Temas	Autores	Año	Citas	Correlaciones
Cementos alternativos				
Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction	Angulo-Ramirez et al.	2018	17	3
Alkali-Aggregate Reaction: A study of the influence of the petrographic characteristics of volcanic rocks	Tiecher et al.	2018	2	5
Reacción álcali-árido e implicación estructural				
Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam	Campos et al.	2018	12	21
Deterioration Assessment of Infrastructure Using Fuzzy Logic and Image Processing Algorithm	Pragalath et al.	2018	9	0
FE approach to perform the condition assessment of a concrete overpass damaged by ASR after 50 years in service	Gorga et al.	2018	6	26
Impact of pore solution concentration on the accelerated mortar bar alkali-silica reactivity test	Golmakani e Hooton	2019	5	1
Structural implications of internal swelling reactions in concrete: review and research needs	Noel et al.	2018	2	12
Material, structural and modelling aspects of alkali aggregate reaction in concrete	Ferche et al.	2019	2	10

4. CONCLUSIONES

El análisis realizado a partir de la revisión sistemática muestra que Canadá es el país que más se destaca en la publicación de artículos científicos en revistas de alto impacto a nivel internacional en el ámbito de la reacción álcali-árido. También se evidencia en este trabajo que Brasil es el séptimo país en este ranking de clasificación. La comparación entre investigaciones publicadas de origen canadiense y brasileño indica que Canadá produce tres veces más trabajos de alcance internacional que Brasil relacionados con el tema RAA.

También se evidenció que varios de estos estudios canadienses son realizados en conjunto con autores brasileños. Y la interconexión entre citas y autores indicó que los trabajos realizados entre los dos países se dividen en tres grandes grupos de investigadores liderados por Fournier, Thomas y Berubè, identificando así la correlación entre los temas estudiados.

En cuanto a las categorías temáticas, se identificaron cuatro áreas principales de investigación, a saber: metodologías de evaluación de RAA, uso de adiciones de cemento, reactividad de los áridos, alcalinidad del cemento. El tema con mayor número de publicaciones se refiere a las diversas metodologías aplicadas a la evaluación de RAA, liderado por el canadiense Benoit Fournier, con importantes aportes del brasileño Leandro Sánchez.

En cuanto a los métodos de detección de RAA, se observó que en Brasil, la prueba del prisma de hormigón es poco utilizada en los estudios evaluados, a pesar de estar estandarizada. Además, los análisis de STD y DRI son pocos difundidos en el país, sin embargo, existen publicaciones nacionales en los últimos años que tienden a cambiar este contexto.

Con el criterio y procedimiento de levantamiento bibliográfico aplicado en esta investigación, se demostró que los estudios AAR desarrollados en Brasil se basan en la prueba AMBT, no detectándose el uso de pruebas más confiables como: prueba del prisma de hormigón (CPT), Stiffness Damage Test (SDT) e Damage Rating Index (DRI).

A pesar de esto, Brasil presenta un avance en el número de investigaciones relacionadas con el tema de la RAA, con el fin de identificar, mitigar y solucionar las manifestaciones patológicas resultantes de ella. En el país hay muchos especialistas dedicados al tema, habiéndose organizado varias jornadas específicas sobre RAA, lo que indica el protagonismo nacional en este campo de investigación.

En cuanto a estudios futuros, se observa una tendencia relacionada con RAA y su implicación estructural, así como el efecto de la RAA en cementos alternativos, sin el uso de clinker. Existen esfuerzos en busca de una mejor comprensión de los mecanismos de reacción en distintos agregados y materiales innovadores, así como formas de recuperar estructuras ya afectadas por la reacción.

Brasil muestra un aumento de publicaciones sobre RAA en revistas de alto impacto a lo largo de los años y mostró una presencia preponderante en lo que respecta a los enfoques futuros y lagunas de conocimiento.

A través de un proyecto financiado por la Capes y la Agencia Nacional de Aguas (ANA), y en alianza con la Universidad de Ottawa (Canadá), el Laboratorio de Materiales y Estructuras (LaME) de la Universidad Federal de Paraná (UFPR) comenzó a desarrollar investigaciones aplicando los métodos mencionados. En un futuro próximo, se pretende publicar muchas investigaciones que incluyan resultados de CPT, SDT y DRI en programas experimentales desarrollados en Brasil.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las agencias brasileñas CNPq, Capes y Fundação Araucária por su apoyo financiero, así como a la Universidad Federal de Paraná (UFPR), al Departamento de Construcción Civil (DCC), al Programa de Posgrado en Ingeniería Civil (PPGEC), el Centro de Estudios de Ingeniería Civil (CESEC), el Laboratorio de Materiales y Estructuras (LAME), el Grupo de Patología y Recuperación de la Construcción (PRC) y la Agencia Nacional del Agua (ANA).

6. REFERENCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2018). *NBR 15577: Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2018). *NBRE15577: Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto*. Rio de Janeiro.

- Adams, D. F., Walrath, D. E. (1987). *Current status of the Iosipescu shear test method*, J. Compos. Mater. 21: 494–507. <https://doi.org/10.1177/002199838702100601>
- Adorno, C. S., Langaro, E. A., Medeiros, M. H. F., Gobbi, A. (2020). *Teste acelerado de argamassas e a combinação de adições minerais ativas com agregado potencialmente reativo*. Journal of Urban Technology and Sustainability. 3: 36-50. <https://doi.org/10.47842/juts.v3i1.23>
- Adorno, C. S., Medeiros, M. H. F., Filho, J. H., Réus, G. C. (2018). *Effects of the addition of red ceramic, limestone filler and rice husk ash in alkali silica reaction*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 3: 1-11. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0030-0>
- Alaejos, P., Lanza, V., Bermúdez, M. A., Velasco, A. (2014). *Effectiveness of the accelerated mortar bar test to detect rapid reactive aggregates (including their pessimum content) and slowly reactive aggregates*. Cement and Concrete Research. 58: 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.001>
- Andrade Neto, J. S., França, M. J. S., Amorim Júnior, N. S., Vêras Ribeiro, D. (2021). *Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete*. Construction and Building Materials. 266: 120959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120959>
- Angulo-Ramírez, D. E., Gutiérrez, R. M., Medeiros, M. H. F. (2018). *Alkali-activated Portland blast furnace slag cement mortars: Performance to alkali-aggregate reaction*. Construction and Building Materials. 179: 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.183>
- Berubè, M. A., Dorion, J., Duchesne, J., Fournier, B., Vezinac, D. (2003b). *Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali–silica reactivity*. Cement and Concrete Research. 33: 77–84. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00926-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00926-2)
- Berubè, M. A., Duchesne, J., Dorion, J. F., Rivest, M. (2002). *Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali–silica reactivity*. Cement and Concrete Research. 32: 1215–1227. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00766-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00766-4)
- Berubè, M. A., Duchesne, J., Ollivier, J. P., Ballivy, G. (2003). *Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali–aggregate reactivity*. Cement and Concrete Research 33: 1147–1153. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00020-6)
- Bérubé, M. A., Smaoui, N., Bissonnette, B., Fournier, B. (2005). *Outil d'évaluation et de gestion des ouvrages d'art affectés de réactions alcalis-silice (RAS)*. Études et Recherches en Transport, Ministère des Transports du Québec, Canada.
- Beyene, M., Snyder, A., Lee, R. J., Blaszkiewicz, M. (2013). *Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates*. Cem. Concr. 51: 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.014>
- Blight, G. E., Mciver, J. R., Schulte, W. K., Rimmer, R. (1981). “*The effects of alkali–aggregate reaction on reinforced concrete structures made with Witwatersrand quartzite aggregate*”. 5th ICAAR — International Conference on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa.
- Bolotte, B. (1992). “*Development of an accelerated performance test on concrete for evaluating its resistance to AAR*.” The 9th International Conference on Alkali–Aggregate Reactivity in Concrete. United Kingdom, London.
- Broekmans, M. A. T. M. (2002). “*The Alkali – Silica Reaction: Mineralogical and Geochemical Aspects of some Dutch Concretes and Norwegian Mylonites*”, PhD Thesis, Utrecht University, The Netherlands.
- Campos, A., López, C. M., Blanco, A., Aguado, A. (2018). *Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam*. Construction and Building Materials. 166: 668-683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.180>

- Chrisp, T. M., Waldron, P., Wood, J. G. (1993). *Development of a non-destructive test to quantify damage in deteriorated concrete*. Magazine of Concrete Research. 45 (165): 247–256. <https://doi.org/10.1680/mac.1993.45.165.247>
- Clemena, G. G., Lane, S., Freeman, T., Lozev, M. (2000). *Evaluation of Nondestructive Evaluation Methods for Application in Early Detection of Deterioration in Concrete Pavements*. VTRC 00-R13 Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, USA.
- Crouch, R. S., Wood, J. G. M. (1990). *Damage evolution in ASR affected concretes*. Eng. Fract. Mech. 35: 211–218.
- De Carvalho, M. R. P., Faisbain, E. M. R., Filho, R. D. T., Cordeiro, G. C., Hasparyk, N. P. (2010). *Influence of steel fibers on the development of alkali-aggregate reaction*. Cement and Concrete Research. 40(4): 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.007>
- De Souza, D. J., Sanchez, L. F. M., De Grazia, M. T. (2019). *Evaluation of a direct shear test setup to quantify AAR-induced expansion and damage in concret*. Constr. Build. Mater. 229: 116806. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.116806>.
- Degrosbois, M., Fontaine, E. (2000). “*Performance of the 60 °C-Accelerated Concrete Prism Test for the evaluation of potential alkali–reactivity of concrete aggregates*”. The 11th International Conference on Alkali–Aggregate Reactivity in Concrete. Quebec City, QC, Canada.
- Drolet, C., Duchesne, J., Fournier, B. (2017). *Effect of alkali release by aggregates on alkali-silica reaction*. Construction and Building Materials. 157: 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.085>
- Drolet, C., Duchesne, J., Fournier, B. (2017). *Validation of the alkali contribution by aggregates to the concrete pore solution*. Cement and Concrete Research. 98: 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.001>
- Duchesne, J., Berubè, M. A. (2001). *Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali–silica reaction*. Cement and Concrete Research. 31: 1057–1063. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00538-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00538-5)
- Dunbar, P.A., Grattan-Bellew, P. E. (1995). “*Results of damage rating evaluation of condition of concrete from a number of structures affected by ASR*”. CANMET/ACI International Workshop on Alkali–Aggregate Reactions in Concrete, Darmouth, Canada. pp. 257-266.
- Feng, X., Thomas, M. D. A., Bremner, T. W., Folliard, K. J., Fournier, B. (2010). *Summary of research on the effect of LiNO₃ on alkali–silica reaction in new concrete*. Cement and Concrete Research. 40: 636–642. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.021>
- Fiset, M., Sanchez, L. F. M., Bilodeau, S., Mitchell, D., Bastien, J. (2021). *Influence of Alkali-Silica reaction (ASR) on aggregate interlock and shear-friction behavior of reinforced concrete members*. Engineering Structures. 233: 111890. <https://doi.org.ez48.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.engstruct.2021.111890>
- Fournier, B., Bérubé, M.-A. (2000). *Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications*. Canadian Journal of Civil Engineering. 27(2): 167–191. <https://doi.org/10.1139/199-072>
- Fournier, B., Bérubé, M. A., Folliard, K., Thomas, M. D. A. (2010). *Report on the diagnosis, prognosis, and mitigation of alkali-silica reaction (ASR) in transportation structures*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication FHWA-HIF-09-004.
- Fournier, B., Chevrier, R., Degrosbois, M., Lisella, R., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M., Thomas, M., Baxter, S. (2004). “*The accelerated concrete prism test (60 °C): variability of the test method and proposed expansion limits*”. The 12th International Conference on Alkali–Aggregate Reaction in Concrete, Beijing China.
- Gallo, G., Sanchez, L., Medeiros, M. H. F., Andrade, T. (2007). *Medidas preventivas para a reação álcali-agregado (RAA) no concreto*. Concreto & Construções. 46: 22-28.

- Glänzel, W. (2003). “*Bibliometrics as a research field: a course on theory and application of bibliometric indicators*”. *Course handouts*. Bélgica.
- Golmakani, F., Hooton, R. (2016). “*Comparison of laboratory performance tests used to assess alkali-silica reactivity*”. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*. 2: 1–7.
- Grattan-Bellew, P. E., Cybanski, G., Fournier, B., Mitchell, L. (2003). *Proposed Universal Accelerated Test for Alkali-Aggregate Reaction The Concrete Microbar Test*. *Cement, Concrete, and Aggregates*. 25: 2.
- Grattan-Bellew, P. E., Danay, A. (1992). “*Comparison of laboratory and field evaluation of AAR in large dams Proc. of the International Conference on Concrete AAR in Hydroelectric*”. *Plants and Dams, Canadian Electrical Association & Canadian National Committee of the Int. Commission on Large Dams, Fredericton New Brunswick, Canada*.
- Grattan-Bellew, P. E., Mitchell, L. D. (2006). “*Quantitative petrographic analysis of concrete — The Damage Rating Index (DRI) method, a review Proc*”. *Marc-André Bérubé Symposium on AAR in Concret. CANMET/ACI Advances in Concrete Technology Seminar, Montréal, Canada*, 1: 321-334.
- Gorga, T., Sanchez, L. F. M., Martín-Pérez, B. (2018). *FE approach to perform the condition assessment of a concrete overpass damaged by ASR after 50 years in service*. *Engineering Structures*. 177: 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.043>
- Golmakani, F. R., Hooton, D. (2019). *Impact of pore solution concentration on the accelerated mortar bar alkali-silica reactivity test*. *Cement and Concrete Research*. 121: 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.008>
- Haskett, M., Oehlers, D. J., Mohamed Ali, M. S., Sharma, S. K. (2011). *Evaluating the shear-friction resistance across sliding planes in concrete*. *Eng. Struct.* 33: 1357–1364. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.013>.
- Hasparyk, N. P., Monteiro, P. J., Molin, D. C. C. (2009). *Investigation of mechanical properties of mass concrete affected by alkali-aggregate reaction*. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 21: 294:297. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.007>
- Hasparyk, N. P., Sanchez, L. F. M. (2021). “*SDT – Método de ensaio para a determinação do índice de dano de rigidez (SDI) e índice de deformação plástica (PDI) em concretos*”. *Instrução técnica ITDSBE001. FURNAS. Goiânia. Brasil*. p. 19.
- Hjørland, B. (2013). *Citation analysis: A social and dynamic approach to knowledge organization*. *Information Processing and Management*. 49: 1313–1325. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2013.07.001>
- Ideker, J. H., East, B. L., Folliard, K. J., Thomas, M. D. A., Fournier, B. (2010). *The current state of the accelerated concrete prism test*. *Cement and concrete research*. 40(4): 550-555. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.030>
- Johnson, C. V., Chen, J., Hasparyk, N. P., Monteiro, P. J. M., Akono, A. T. (2017). *Fracture properties of the alkali silicate gel using microscopic scratch testing*. *Cement and Concrete Composites*. 79: 71-75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.012>
- K. J. Murdock, K. J., Blanchette, A. (1994). *Rapid evaluation of alkali-aggregate reactivity using a 60 °C concrete prism test*. *The 3 rd International Conference on Durability of Concrete*. Nice, France.
- Katayama, T., Grattan-Bellew, P. E. (2012). “*Petrography of the Kingston experimental sidewalk at age 22 years--ASR as the cause of deleteriously expansive, so-called alkali-carbonate reaction*”. in: *Proc. 14th Int. Conf. Alkali-Aggregate React. Concr. Austin, Texas, USA*.
- Katayama, T., Jensen, V., Rogers, C. A. (2016). *The enigma of the ‘so-called’ alkali-carbonate reaction*. *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 169(4): 223-232. <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00071>

- Kermit, P. H. (2017). “*Determining alkali content in ASR performance-tested concrete*”. Master of Science in Engineering and ICT. Norwegian University of Science and Technology. Department of Structural Engineering. p.72.
- Kubo, Y., Nakata, M. (2012). “*Effect of reactive aggregate on mechanical properties of concrete affected by alkali-silica reaction*”. In: Proceedings of the 14th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete. Austin. Texas. Electronic.
- Lindgård, J. (2011). “*Literature survey on performance testing*”. RILEM TC 219-ACS-P. p. 164.
- Lindgard, J., Andiç-Cakir, O., Fernandes, I., Ronning, T., Thomas, M. D. A. (2012). *Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing*. Cement and Concrete Research. 42: 223–243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.004>
- Lindgård, J., Fournier, B., Ronning, T. F., Thomas, M. D. A. (2016). *Alkali-aggregate reaction: performance testing, exposure sites and regulations Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials*. 169: 189-196. <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00077>
- Lindgard, J., Sellevold, E. J., Thomas, M. D. A., Pedersen, B.; Justnes, H.; Ronning, T. (2013). *Alkali-silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on concrete porosity, moisture state and transport properties*. Cement and Concrete Research. 53: 145–167. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.020>
- Lindgard, J., Skjolsvold, O., Haugen, M., Hagelia, P., Wigum, B. J. (2004). “*Experience from evaluation of degree of damage in fluorescent impregnated plan polished sections of half-cores based on the “Crack Index Method”*”. 12th ICAAR — International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China. pp. 939-947.
- Lindgard, J., Thomas, M. D. A., Sellevold, E. J., Pedersen, B., Andiç-Cakir, O., Justnes, H., Ronning, T. (2013). *Alkali-silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion*. Cement and Concrete Research. 53: 68–90. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.017>
- Lu, D., Mei, L., Xu, Z., Tang, M., Fournier, B. (2006). *Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete (I) Alteration of alkali reactive aggregates in alkali solutions*. Cement and Concrete Research. 36: 1176–1190. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.008>
- Lu, D., Zhou, X., Xu, Z., Lan, X., Tang, M., Fournier, B. (2006). *Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete*. Cement and Concrete Research. 36: 1157–1165. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.004>
- Lucas, E. O., Garcia-Zorita, J. C., Sanz-Casado, E. (2013). *Evolução histórica de investigação em informetria: ponto de vista espanhol*. Liinc em Revista. 9 (1): 255-270. <https://doi.org/10.18617/liinc.v9i1.509>
- Mariano, A. M., Rocha, M. S. (2017). “*Revisão da literatura: apresentação de uma abordagem integradora*”. XXVI Congresso Internacional AEDem. Reggio Calabria. Italia.
- Martin, R. P., Sanchez, L., Fournier, B., Toutlemonde, F. (2017). *Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete*. Construction and Building Materials. 156: 956–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.047>
- Munhoz, G. S., Dobrovolski, M. E. G., Pereira, E., Medeiros Junior, R. (2021). *Effect of improved autogenous mortar self-healing in the alkali-aggregate reaction*. Cement and Concrete Composites. 117: 103905. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103905>
- Naar, R. (2010). “*Modelisation du comportement mécanique du béton par approche multi-physique (couplage chimie-mécanique): application à la réaction alcalisilice*”. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris (France).

- Noel, M., Sanchez, L., Tawil, D. (2019). *Structural implications of internal swelling reactions in concrete: review and research needs*. Magazine of concrete research. 70(20): 1052-1063. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00383>
- Prado, R. J., Tiecher, F., Hasparyk, N. P., Dal Molin, D. C. C. (2019). *Structural characterization of alkali-silica reaction gel: Na x-ray absorption fine structure study*. Cement and Concrete Research. 123: 105774. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.019>
- Pragalath, H., Seshathiri, S., Rathod, H., Balasubramanian Esakki, S. M. A. S. C. E. (2018). *Deterioration Assessment of Infrastructure Using Fuzzy Logic and Image Processing Algorithm*. Journal of Performance of Constructed Facilities. 32: 1-13. 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001151
- Ranc, R., Debray, L. (1992). “Reference test methods and a performance criterion for concrete structures”. The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. London.
- Rivard, P., Berubè, M. A., Ollivier, J. P., Ballivy, G. (2007). *Decrease of pore solution alkalinity in concrete tested for alkali-silica reaction*. Materials and Structures. 40:909–921. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9191-z>
- Rivard, P., Fournier, B., Ballivy, G. (2000). *Quantitative petrographic technique for concrete damage due to ASR: experimental and application*. Cem Concr Aggreg. 22 (1):63-72. <https://doi.org/10.1520/CCA10465J>
- Salomon, M., Panetier, J. L. (1994). “Quantification du degré d'avancement de l'alkali-réaction dans les bétons et de la néofissuration associée”. 3rd CANMET/ACI International conference on durability of concrete. Nice, France. pp. 383-401.
- Sanchez, L. F. (2014). “Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate reaction”. Tese (Doutorado) — Université Laval. p. 377.
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J., Mitchell, D. (2017). *Tools for assessing damage in concrete affected by AAR coming from fine and coarse aggregates*. Revista Ibracon De Estruturas E Materiais. 10:84-91. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000100005>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Mitchell, D., Bastien, J. (2017). *Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures*. Cem. Concr. Res. 93: 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.12.001>
- Sanchez, L., Kuperman, S. C., Helene, P. (2011). *Uso do método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT) para avaliação da reação álcali-agregado (RAA)*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais (RIEM). 4(4):575–581. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952011000400004>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J. (2015). *Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses*. Construction and Building Materials. 77: 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.071>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J. (2014). *Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates*. Cement and Concrete Research. 56: 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.003>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J., Mitchell, D. (2016). *Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction*. Construction and Building Materials. 125: 1178–1188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.101>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Duchesne, J., Bedoya, M. A. B., Bastien, J. (2016). *Use of Damage Rating Index to Quantify Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete: Fine versus Coarse Aggregate*. ACI MATERIALS JOURNAL. 113: 395-407. <http://dx-doi.ez48.periodicos.capes.gov.br/10.14359/51688983>

- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Duchesne, J. (2015). *Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI)*. Cement and Concrete Research. 67: 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.08.002>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Mitchell, D., Bastien, J. (2017). *Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures*. Cement and Concrete Research. 93: 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.12.001>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Bastien, J., Mitchell, D. (2017). *Tools for assessing damage in concrete affected by AAR coming from fine and coarse aggregates*. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 10(1): 84-91. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000100005>
- Santos, B. S., Ribeiro, D. V. (2021). *Influence of granitic rock fines addition in the alkali-aggregate reaction (AAR) in cementitious materials*. Revista Ibracon De Estruturas E Materiais. 14: 14203. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000200003>
- Shehata , H. S. M., Thomas, M. D. A. (2006). *Alkali release characteristics of blended cements*. Cement and Concrete Research. 36: 1166–1175. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.02.015>
- Shehata , H. S. M., Thomas, M. D. A. (2002). *Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali–silica reaction in concrete*. Cement and Concrete Research. 32: 341–349. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00680-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00680-9)
- Shehata, H. S. M., Thomas, M. D. A. (2000). *The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali–silica reaction*. Cement and Concrete Research. 30:1063– 1072. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00283-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00283-0)
- Shehata, H. S. M., Thomas, M. D. A. (2010). *The role of alkali content of Portland cement on the expansion of concrete prisms containing reactive aggregates and supplementary cementing materials*. Cement and Concrete Research. 40: 569–574. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.009>
- Shon, C. S. C.-S., Zollinger, D. G., Sarkar, S. L. (2002). *Evaluation of modified ASTM C 1260 accelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity*. Cement and Concrete Research. 32(12):1981–1987. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00903-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00903-1)
- Silva, C. S., Santos, M., Monteiro, E. C. B.; Andrade, T. W. C. O.; Soares, W.; Neves, D. (2021). *Recovery procedures for foundation elements with alkali/aggregate reaction problems*. Documental research. Revista ALCONPAT. 11(2): 124–145. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.490>
- Sims, I., Hunt, B., Miglio, B. (1992). “*Quantifying microscopical examinations of concrete for AAR and other durability aspects*”. Am Concr Inst. Idorn international symposium. Annual ACI convention. Toronto. Ontario. Canada. 131–114, pp. 267-287.
- Skolu, S. O., Thomas, M. D. A., Hooton, R. D. (2007). *Dual effectiveness of lithium salt in controlling both delayed ettringite formation and ASR in concretes*. Cement and Concrete Research. 37: 942–947. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.014>
- Smaoui, N., Bérubé, M. A., Fournier, B., Bissonnette, B., Durand, B. (2004). *Evaluation of the xpansion attained to date by concrete affected by alkali-silica reaction. PartI: Experimental study*. Canadian Journal of Civil Engineering. 31(5): 826–845. <https://doi.org/10.1139/104-104>
- Thomas, M. D. A., Folliard, K. J. (2007). “*Concrete aggregates and the durability of concrete*”. Durab. Concr. Cem. Compos. 247–281. <https://doi.org/10.1533/9781845693398.247>
- Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M. (2006). *Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete*. Cement and Concrete Research. 36,(10):1842–1856. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.014>
- Tiecher, F., Dal Molin, D. C. C., Gomes, M. E. B., Hasparyk, N. P., Monteiro, P. J. M. (2012). *Influence of mesostasis in volcanic rocks on the alkali-aggregate reaction*. Cement and Concrete Composites. 34(10): 1130-1140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.009>

- Tiecher, F., Gomes, M. B., Dal Molin, D. C. C. (2018). *Alkali-Aggregate Reaction: A Study of the Influence of the Petrographic Characteristics of Volcanic Rocks*. Engineering, Technology & Applied Science Research. 8(1): 2399-2404. <https://doi.org/10.48084/etasr.1731>
- Tiecher, F., Dal Molin, D. C. C., Gomes, M. E. B., Hasparyk, N. P., Monteiro, P. J. M. (2017). *Relationship between degree of deformation in quartz and silica dissolution for the development of alkali-silica reaction in concrete*. Materials. 10(9): 1022. <https://doi.org/10.3390/ma10091022>
- Touma, W. E., Fowler, D. W., Carrasquillo, R. L. (2001). “*Alkali-silica reaction in portland cement concrete: testing methods and mitigation alternatives*”. Report ICAR 301-1F. International Center for Aggregates Research, Austin, Texas.
- Walsh, J. B. (1965). *The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks*. J Geophys Res. 70:399-411. <https://doi.org/10.1029/JZ070i002p00399>
- Xue, L., Zang, Z., Wang, H. (2021). *Hydration mechanisms and durability of hybrid alkaline cements (HACs): A review*. Construction and Building Materials. 266: Part A, 121039. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121039>
- Zhu, Y., Zahedia, A., Sanchez, L. F.M., Fournier, B., Beauchemin, S. (2021). *Overall assessment of alkali-silica reaction affected recycled concrete aggregate mixtures derived from construction and demolition waste*. Cement and Concrete Research. 142: 106350. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106350>