

Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil

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

* Autor de Contato: frareandreza@gmail.com

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

Recebido: 12/07/2022 | Correções recebidas: 26/11/2022 | Aceito: 21/12/2022 | Publicado: 01/01/2023

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.

Citar como: Frare, A., Langaro, E., De Souza, D. J., Medeiros, M. H. F. (2023), "Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no 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.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o primeiro autor contribuiu com revisão bibliográfica, metodologia aplicada, pesquisa, discussão dos resultados e conclusões com um percentual de 80%. O segundo e o terceiro autores contribuíram com a revisão bibliográfica e revisão com um percentual de 20% e o quarto autor contribuiu com a ideia original, direcionamento e revisão do texto.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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 VOSviewer 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 RAA 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 RAA 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

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es comparar el desempeño de Canadá y Brasil en estudios relacionados con la reacción de agregado alcalino (AAR) en el concreto, a través de una revisión cualitativa, cuantitativa y sistemática de la literatura, además de utilizar el software VOSviewer para el 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 AAR y el panorama de la investigación sobre el tema en Brasil. Finalmente, el trabajo mostró que entre los temas emergentes sobre RAA y lagunas de conocimiento.

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

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A reação álcali-agregado (RAA) é um dos mecanismos de deterioração mais nocivos que afetam a durabilidade e a vida útil de estruturas de concreto no mundo. A RAA pode ser dividida em dois tipos principais de reação: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC) (Fournier e Bérubé, 2000). RAS, mais comumente encontrada em estruturas de concreto, é caracterizada pela reação química entre os minerais de sílica instáveis presente nos agregados e os hidróxidos alcalinos (Na^+ , K^+ , OH^-) oriundos, primariamente, da hidratação do cimento Portland, enquanto dissolvidos na solução dos poros do concreto. Por outro lado, a RAC é um tipo de reação muito menos comum, cujo mecanismo ainda é, em grande parte, desconhecido. A RAC é vista por muitos pesquisadores como uma reação que ocorre entre os hidróxidos alcalinos e certos tipos de calcários dolomíticos (Fournier e Bérubé, 2000; Beyene et al., 2013). De maneira geral, é ordinariamente aceito que a RAC é acompanhada por um processo de desdolomitização e formação de calcita e brucita (Thomas e Folliard, 2007), embora diferentes estudos considerem a RAC como uma forma de RAS (Katayama et al., 2012, 2016). Entretanto, as características microscópicas de expansão e deterioração induzidas pela RAC foram separadas da RAS por serem bastante diferentes (Sanchez et al., 2017), o que justifica a distinção dos termos. Independentemente, ambos os mecanismos de deterioração (RAS e RAC) estão presentes em estruturas de concreto de todo o mundo e são responsáveis pela geração de produtos secundários que provocam expansões na presença de umidade. Com a expansão, que ocorre como consequência da RAA, a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto são prejudicadas, com o aparecimento de microfissuras na estrutura afetada (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).

Estudos relacionados a esse tipo de reação expansiva buscam avaliar o grau de reatividade dos agregados presente em diversas regiões (Lu et al., 2006a; Lu et al., 2006b, Drolet et al., 2017a e Drolet et al., 2017b, Santos e Ribeiro, 2021). Outros ainda buscam identificar adições minerais que possam mitigar os efeitos da referida reação (Duchesne e Berubè, 2001 e Grattan-Bellew et al., 2003; Gallo et al., 2007; Adorno et al., 2018; Adorno et al., 2020) e metodologias avaliativas a fim de correlacionar técnicas de ensaios acelerados com os 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). Além disso, tem-se estudos voltados a correlacionar a alcalinidade da matriz cimentante com o desenvolvimento da RAA (Shehata et al., 2000; Shehata et al., 2002; Shehata et al., 2006; Shehata et al., 2010).

Avaliar e estudar a RAA é de suma importância para que se possa caracterizar e identificar fatores que influenciam na vida útil das estruturas de concreto. Pesquisadores de vários países têm buscado entender os efeitos da RAA desde que ela foi identificada pela primeira vez. Dentre os países que mais publicam artigos em revistas de alto impacto científico sobre RAA, encontra-se o Canadá. Os pesquisadores do Brasil tem um histórico importante de parcerias e interações de pesquisas sobre este tema com os investigadores atuantes no Canadá. Neste contexto, a presente pesquisa consiste em realizar um levantamento bibliográfico a fim de analisar os principais temas de estudos relacionados a RAA desenvolvidos por autores canadenses e brasileiros, bem como as metodologias avaliativas e temas em ascensão. A importância do desenvolvimento deste trabalho é produzir um panorama geral no sentido de entender melhor as tendências relacionadas aos estudos de reação álcali-agregado no meio científico dos dois países envolvidos. Além disso, o trabalho apresenta uma importante discussão sobre o uso do método acelerado de barras de argamassas para as pesquisas de RAA, em comparação com métodos de maior duração como o teste em prismas de concreto, considerado mais realista, e com métodos de avaliação de danos como o Damage Rating Index (DRI) e o Stiffness Damage Test (SDT).

2. METODOLOGIA

A pesquisa consiste na realização de uma revisão qualitativa, integrativa e sistemática a fim de comparar os estudos e métodos avaliativos da reação álcali-agregado nos dois países, Canadá e Brasil.

Primeiramente, definiu-se o termo de busca "Alkali-aggregate reaction" e posteriormente buscou-se a palavra chave nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus. Ambas apresentam uma excelente cobertura temporal, com registros a partir dos anos 1945 e 1970 respectivamente, até o presente momento. Além disso, estas bases de dados englobam grande número de periódicos, eventos e editoras com sistema de revisão por pares, o que contribui para a variedade e qualidade das publicações. O período de busca contemplado foi todo o espaço temporal disponível das bases de dados considerando todas as áreas de pesquisas registradas. O levantamento dos dados foi realizado no dia 13 de janeiro de 2022.

Foram realizadas análises relacionadas quanto ao número de publicações de cada país, principais autores sobre o tema e número de citações. Por fim, buscou-se realizar o detalhamento das publicações e validações das evidências a partir de análises de co-citação e acoplamento bibliográfico, o que permite identificar a relação entre autores e referências, assim como desenvolvido por Mariano e Rocha (2017). Para a formação das redes foi utilizado o software VOSviewer 1.6.10, que realiza uma leitura dos dados e utiliza algoritmos de clusterização, os separando em grupos de acordo com as vertentes de estudo.

2.1 Número de publicações - Brasil e Canadá

A Figura 1 identifica o número de publicações encontradas nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus em revistas de alto impacto utilizando o termo "Alkali-aggregate reaction" e a contribuição de cada país sobre o tema. Foram evidenciadas na Figura 1 as publicações dos 10 países mais destacados na produção científica mundial sobre o tema reação álcali agregado.

Observando a Figura 1, e somando o número de publicações das duas bases, e excluindo-se trabalhos repetidos, é possível rankear os países. Assim, nota-se que o país que mais contribuiu com pesquisas relacionadas a RAA foi o Canadá com 215 publicações, seguido dos Estados Unidos e da China com 170 e 167 publicações, respectivamente. O Brasil ocupa a sétima colocação contribuindo com 50 publicações.

Na base de dados WoS encontrou-se ao todo 727 registros sobre RAA, sendo que 113 destas publicações são de origem canadense e 33 são brasileiras. Na base de dados Scopus, obteve-se 1096 registros onde o Canadá contribuiu com 173 publicações e o Brasil com 46. De maneira geral, à partir das informações obtidas constata-se que o Canadá é o país que mais contribui com estudos relacionados a RAA, representando cerca de 22% do total, enquanto o Brasil representa 5,7%. Desse modo, o número de pesquisas publicadas sobre "Alkali-aggregate reaction" no Canadá é quase quatro vezes maior do que no Brasil.

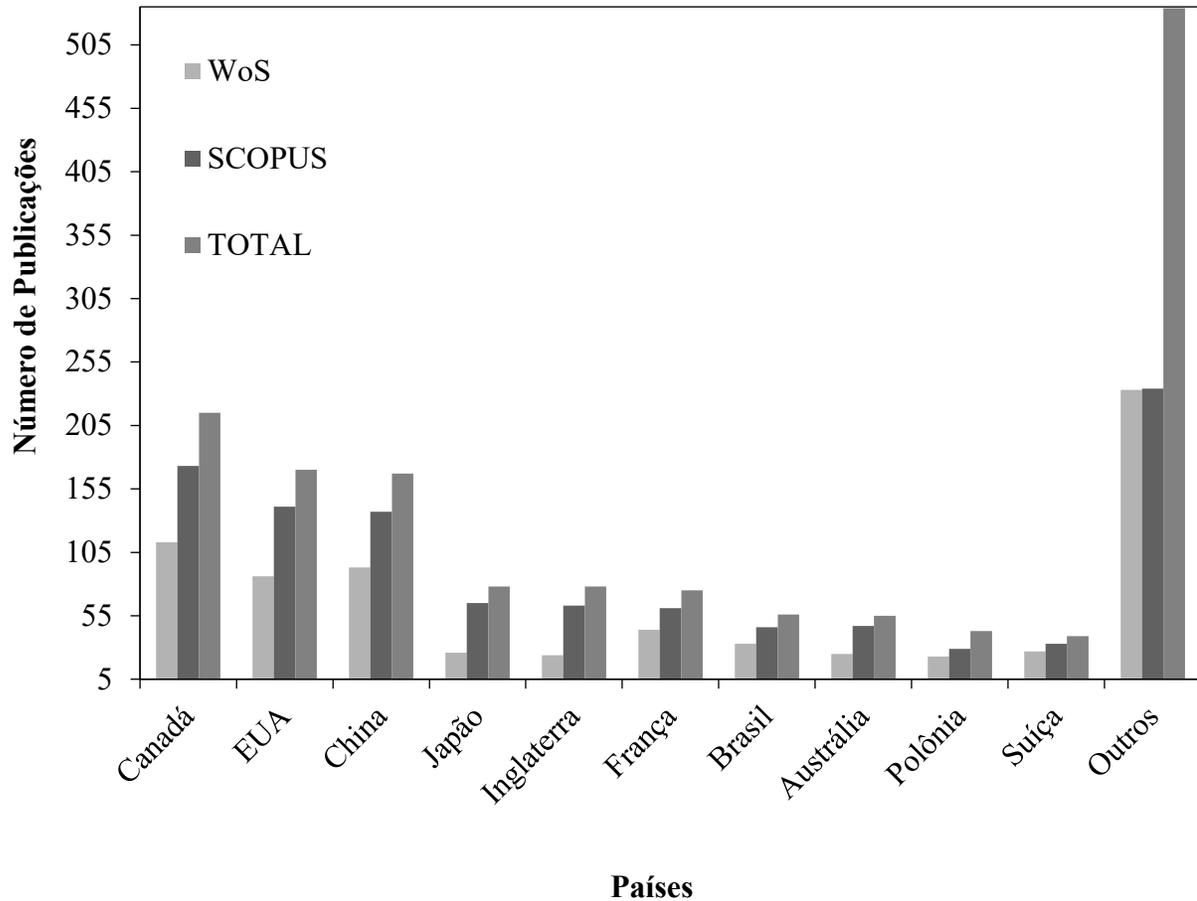


Figura 1. Número de publicações na base de dados WoS e Scopus com o termo "Alkali-aggregate reaction" no título.

2.2 Análise de co-citação - Brasil e Canadá

A análise de co-citação é baseada na frequência em que dois autores ou documentos são citados juntos em artigos posteriores. Isso indica uma proximidade entre os temas de pesquisa abordados e dos pesquisadores. Assim, é possível distinguir através de análises iterativas um domínio do conhecimento (Hjorland, 2013).

A interligação das citações caracterizam a pesquisa de acordo com a natureza social, histórica e dinâmica e colabora para identificar a dependência da literatura acadêmica, o que permite determinar os principais grupos de pesquisas relacionados aos temas de estudo e suas publicações de maior impacto (Glänzel, 2003).

As Figuras 2 apresentam as teias de ligação entre os principais grupos de pesquisa e autores relacionados à RAA no Canadá e no Brasil, extraídos das bases de dados WoS e Scopus, respectivamente.

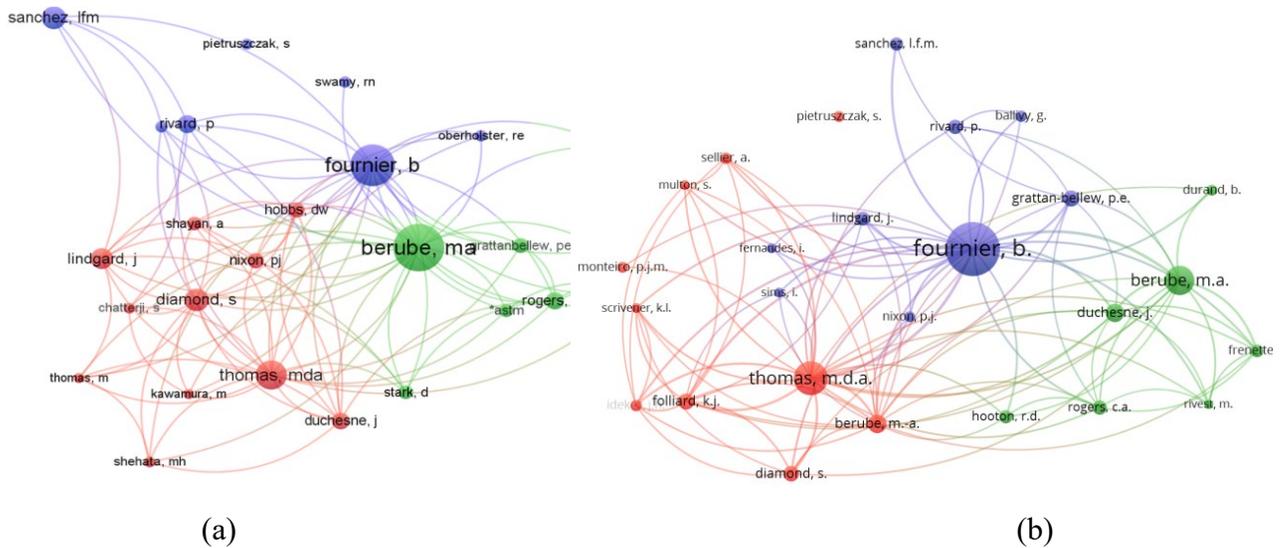


Figura 2. Ligação entre os principais grupos de pesquisas focados na investigação da reação álcali-agregado, com dados obtidos na WoS (a) e na Scopus (b).

Analisando as Figuras 2, pode-se observar três grandes temas de pesquisas liderados por Fournier, Thomas e Berubé com 29, 21 e 14 publicações de cada autor, respectivamente, para a base de dados WoS e para a Scopus, excluindo-se trabalhos repetidos.

Os três grandes grupos de temas pesquisados são liderados por autores canadenses, e nessas linhas de pesquisas autores Brasileiros como Sanchez e Monteiro compartilham similaridade nos temas, relacionando-se principalmente com técnicas avaliativas da RAA. O primeiro atua como professor na Universidade de Ottawa, Canadá, e tem interação com as pesquisas do grupo do Professor Fournier, localizado na Universidade de Laval, Quebec City, também no Canadá. O segundo, atualmente é professor na Universidade de Califórnia, Berkeley, EUA. Este que também integra um grupo de pesquisas liderado por Hasparyk em Furnas Centrais Elétricas, Departamento de Concreto & Controle de Qualidade, em Aparecida de Goiânia, GO, Brasil e com parcerias da Professora Dal Molin da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. As abordagens pesquisadas por Monteiro interagem significativamente com os assuntos estudados por Thomas.

O capítulo seguinte busca aprofundar mais o assunto dos trabalhos desenvolvidos pelos autores citados anteriormente, a partir de uma seleção dos artigos com maior número de citações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Temas de maior relevância entre os artigos mais citados

A rede de ligação entre os autores identifica a semelhança dos temas estudados. Assim, escolheu-se as publicações divulgadas a partir do ano 2000, com mais de cinco citações de cada autor listado anteriormente, para análise das linhas de pesquisas.

Diversas pesquisas realizadas em conjunto com outros pesquisadores, englobam uma série de assuntos relacionados a reação álcali-agregado, tornando-se referência no assunto, internacionalmente.

Pesquisas relacionadas a metodologias avaliativas de RAA foram realizados por Ideker et al. (2010), Lindgard et al. (2012), Sanchez et al. (2014), Sanchez et al. (2015a), Sanchez et al. (2015b),

Sanchez et al. (2016a), Sanchez et al. (2016b), Lindgard et al. (2016), Sanchez et al. (2017) e Martin et al. (2017).

Os estudos indicaram que o Teste de Dano de Rigidez (SDT) pode ser utilizado como forma de avaliar a RAA e avaliar o dano relacionado a expansão alcançada pelo concreto (Martin *et al.*, 2017). Porém, parâmetros como as condições ambientais, as características das amostras e o histórico de condicionamento da amostra parecem influenciar significativamente os resultados do ensaio de carregamento cíclico. Por outro lado, diferentes tipos de preparação de superfície e o tamanho das amostras não parecem modificar as análises do teste (Sanchez et al., 2014; Sanchez et al., 2015a; Sanchez et al., 2016a e Sanchez et al., 2017).

O Índice de Classificação de Danos (DRI), ferramenta petrográfica por microscopia e semiquantitativa, também se mostrou eficaz para a avaliação de RAA (Martin et al., 2017), e a partir das análises com diversos agregados reativos desenvolveu-se um modelo quantitativo para essa avaliação (Sanchez et al., 2015b e Sanchez et al., 2016b).

Além disso, estudos avaliando a confiabilidade e comparativos entre testes de expansão em barras de argamassas e de campo indicam que o método acelerado em argamassa, apesar de ser utilizado por mais de 15 anos em todo o mundo, ainda precisa ser melhor calibrado para transpor ou se aproximar da realidade das estruturas, para todos os tipos de agregados e ligantes, pois os mesmos podem apresentar resultados falsos negativos e falsos positivos. Além disso, parâmetros como, temperatura, pH e concentração de álcalis na solução de exposição, devem ser considerados e os mesmos influenciam no desempenho dos testes (Jason et al., 2010; Lindgard et al., 2012; Lindgard et al., 2016).

Quanto aos ensaios de reatividade dos agregados, estudos indicam que quanto mais finas as partículas e maior a temperatura, maior e mais rápida a liberação de álcalis. Além disso, a ativação térmica tem o maior efeito sobre o gnaíse e um efeito inferior e semelhante em granito e feldspato (Lu et al., 2006a, Lindgard et al., 2013a e 2013b). Também foi observado que, quando submetidos a exposição em soluções de Ca(OH)_2 , NaOH e KOH, o ensaio em barras de argamassa apresenta mais álcalis liberados nas soluções (com NaOH e KOH) em comparação com a solução saturada com Ca(OH)_2 (Berubè et al., 2002).

Berubè et al. (2003a), Rivard et al. (2007) e Shehata et al. (2010) investigaram os efeitos do conteúdo alcalino nos cimentos e verificaram que o teor de álcalis no cimento tem efeito significativo na expansão dos prismas de concreto e argamassas e depende da proporção e do agregado utilizado. Além disso, Berubè et al. (2003b) indicaram que concretos com baixo teor de álcalis são uma boa opção para condições de exposição marítimas ou saís de degelo.

Para mitigar os efeitos da RAA em concretos, pesquisadores avaliaram o efeito de adições minerais ao mesmo e constataram que a presença de algumas adições reduz significativamente as expansões geradas por RAA (Duchesne e Berubè, 2001; Grattan-Bellew et al., 2003). Outros estudos mostram que misturas de cimento-sílica ativa não foram eficientes na retenção de álcalis em seus produtos de hidratação, no entanto, misturas de cimento com sílica ativa e cinza volante tem capacidade de aglomerar e reter álcalis (Shehata et al., 2000; Shehata et al., 2002 e Shehata et al., 2006, Xue et al., 2021, Andrade Neto et al., 2021).

Skolu et al. (2007) e Feng et al. (2010) investigaram a influência do nitrato de lítio nas expansões em argamassas e concretos. Os resultados obtidos indicaram que o sal de lítio reduziu a ocorrência de expansões devido a formação da etringita tardia, formando uma barreira protetora que evita que a sílica reativa seja atacada por álcalis.

Já Munhoz et al. (2021) avaliaram o efeito da autocura de argamassa autógena melhorada na reação álcali-agregado (AAR). Os resultados mostraram que a argamassa de referência e a mistura com 1% de microfibras de polipropileno apresentaram os maiores e menores níveis de expansão, respectivamente.

Os temas desenvolvidos por pesquisadores brasileiros tratam da investigação de características dos materiais que influenciam no desenvolvimento da RAA (Tiecher et al., 2012; Tiecher et al., 2017), bem como da caracterização do gel produzido pela RAA (Johnson et al., 2017), da investigação de obras com índices de RAA (Hasparyk et al., 2009; Prado et al., 2019) e da análise do comportamento de novos materiais submetidos a RAA (de Carvalho et al., 2009).

Tiecher et al. (2012) estudaram o material da mesostase presente nos interstícios das rochas vulcânicas, com resultados que indicaram que a mesostase nos intersticiais de rochas vulcânicas geralmente consiste em fases minerais micro a criptocristalinas de quartzo, feldspato e argila. A mesóstase foi identificada como tendo características diferentes e, portanto, essa nova caracterização exige uma reavaliação de sua influência na reatividade das rochas vulcânicas. Tiecher et al. (2017) apresentaram uma pesquisa sobre a influencia da deformação do quartzo em agregados no desenvolvimento da reação álcali-silica no concreto e sua relação com a dissolução da sílica. Os resultados apontaram que a presença de quartzo levemente deformado, indica a presença de caminhos internos disponíveis para reagir com as soluções alcalinas dos poros do concreto e aponta para o potencial desenvolvimento de uma reação álcali-silica. Utilizando o teste de espectrofotômetro visível foi possível avaliar o potencial de dissolução das diferentes amostras de quartzo deformado, o que confirmou que a reatividade do quartzo aumenta à medida que aumenta a deformação da estrutura cristalina.

Jonhson et al. (2017) avaliaram as propriedades de fratura do gel produzido pela reação álcali-silica no concreto. Os pesquisadores utilizaram a técnica de microscopia eletrônica de varredura e um modelo de mecânica da fratura e estimaram que a energia de fratura do gel é de $G_f = 11,2 \text{ J/m}^2$.

Na Usina Hidrelétrica de Furnas, Brasil, já identificada com presença de RAA, Hasparik et al. (2009), investigaram as propriedades do concreto afetado. Os resultados ultrassônicos mostraram que a velocidade do pulso é sensível a diferentes graus de deterioração devido a RAA e se correlaciona com o módulo de elasticidade dos concretos investigados. Além disso, o módulo de elasticidade foi a principal propriedade afetada pela RAA.

Já de Carvalho et al. (2009) investigaram o efeito do uso de fibras de aço em argamassas submetidas a RAA. Os resultados mostraram que a adição de fibras de aço reduziu a expansão por RAA. O benefício mais expressivo correspondeu à adição de fibras de 13,0 mm na mistura contendo 2% de fibras.

A maioria dos trabalhos (13 artigos) está relacionada às metodologias de avaliação dos danos causados por reações álcali-agregados. Isso refere-se as tentativas de padronização dos testes utilizados mundialmente e a correlação entre métodos acelerados e de campo (Lindgard et al., 2016). Além disso, a maioria dessas investigações foram lideradas pelo grupo de pesquisas Canadense de Fournier, com contribuições significativas do Brasileiro Sanchez, Professor da Universidade de Ottawa.

Pesquisas relacionadas ao uso de pozolanas totalizam 10 trabalhos enquanto os temas reatividade dos agregados e alcalinidade do cimento Portland apresentam-se com proporções de estudos similares, 7 e 6, respectivamente.

3.2 Métodos de realização dos ensaios

Analisar de forma precisa as amostras de concreto e argamassas sujeitas a RAA proporciona confiabilidade e segurança relacionadas as condições de uso de determinados materiais nas estruturas de concreto armado. Assim, a padronização dos métodos de realização de ensaios permite o comparativo eficiente das condições de testes acelerados e de campo, visando simular de forma mais precisa a realidade. Além disso, entender o quanto a deterioração em estruturas já existentes afetou ou afetará o desempenho da mesma é outra dificuldade a ser dominada no campo de pesquisa da reação álcali-agregado.

Dentro deste contexto, os principais métodos de avaliação para diagnóstico de RAA, bem como o grau de deterioração do concreto como consequência da expansão gerada estão apresentados a seguir.

3.2.1 *Análise Petrográfica*

A análise petrográfica é utilizada para identificação e classificação dos agregados quanto às suas características mineralógicas, estruturais e químicas, a fim de determinar seu possível potencial reativo.

Com base na análise petrográfica da rocha, é possível classificar o agregado quanto à RAA em: potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Os limites máximos de fases reativas geralmente adotados para classificar um agregado como potencialmente inócuo são: 5% (quartzo deletério), 3% (calcedônia), 1% (tridimita ou cristobalita), 3% (vidro vulcânico) e 0,5% (opala). Entretanto, com base na experiência do petrógrafo, bem como, nas feições presentes, pode-se admitir limites levemente distintos. No Brasil, a norma que estabelece um método para a execução de análise petrográfica de amostras representativas de rochas para uso como agregados em concreto, com ênfase nos fatores condicionantes para a ocorrência da reação álcali-agregado (RAA) é a NBR 15577 (2018) parte 3.

Nas últimas décadas, pesquisadores têm buscado desenvolver essa técnica incrementando procedimentos de avaliação diagnóstica e potencial de expansão em estruturas sujeitas ao desenvolvimento da RAA (Sanchez et al., 2015). Nesse contexto, desenvolveram-se vários métodos petrográficos (Blight et al., 1981; Sims e Miglio, 1992, Salomon e Panetier, 1994; Clemena et al., 2000; Rivard et al., 2000; Broekmans, 2002; Lindgard et al., 2004) em todo o mundo, porém o mais utilizado é o *Damage Rating Index* (DRI), aprimorado por Grattan-Bellew e colegas de trabalho (Grattan-Bellew e Danay, 1992; Dunbar e Grattan-Bellew, 1995; Grattan-Bellew e Mitchell, 2006; Sanchez, 2014).

Em 2017, um trabalho de colaboração Brasil-Canadá (Sanchez et al., 2017) foi publicado para divulgar a avaliação da RAA por *Damage Rating Index* (DRI), sendo este um marco importante para a inserção do método no Brasil. Atualmente, o ensaio de *Damage Rating Index* (DRI) está registrado como um documento de Instrução Técnica de FURNAS, de autoria dos renomados pesquisadores brasileiros Nicole Hasparyk e Leandro Sanchez (Hasparyk e Sanchez, 2021). Este fato é um avanço de modo que as pesquisas brasileiras devem passar a ter uso mais frequente desta técnica de investigação de RAA e outras reações expansivas.

3.2.2 *Damage Rating Index (DRI)*

A técnica de índice de classificação de danos ou *Damage Rating Index* (DRI) é uma análise petrográfica semi-quantitativa feita com o auxílio de um esteomicroscópio com magnificação de 15 a 16x (Figura 3), onde as características de deterioração das amostras são contabilizadas através de pequenas áreas com dimensões de 1 cm x 1 cm demarcadas na superfície polida da amostra (Grattan-Bellew, 1995; Villeneuve et al., 2012). É importante salientar que além da quantificação de fissuras encontradas, também são identificadas as suas características petrográficas (Figura 3 e Tabela 1), das quais são multiplicadas por fatores de importância, buscando balancear a influência dos tipos de fissura com relação ao decorrente impacto nas perdas de propriedades mecânicas (Tabela 1) (Sanchez et al., 2015). O número obtido pelo DRI é normalizado para uma área de 100 cm² (Villeneuve, 2011; Sanchez, 2014; Waidner, 2016; Sanchez et al., 2017).

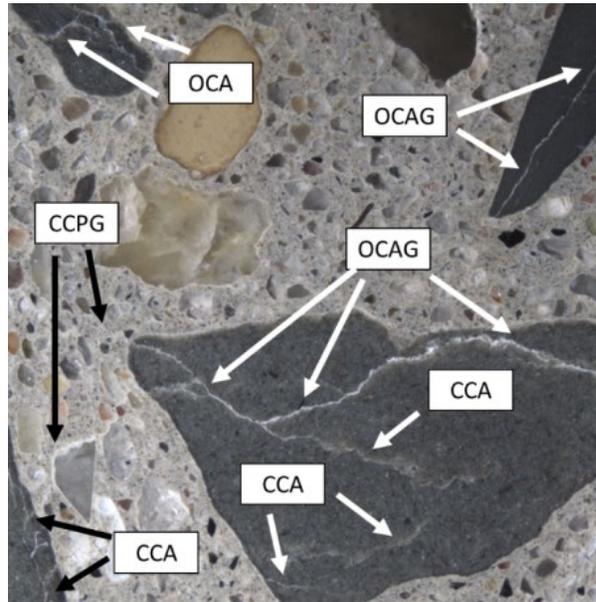


Figura 3. Imagem da técnica de índice de classificação de danos ou *Damage Rating Index (DRI)* realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LaME-UFPR).

Tabela 1. Características ponderadas para análise de DRI.

| Características Petrográficas | Abreviação | Peso | Grupo |
|--|------------|------|-------|
| Fissuras fechadas no agregado | CCA | 0,25 | I |
| Fissuras abertas no agregado | OCA | 2,00 | II |
| Fissuras no agregado e com presença de gel | OCAg | 2,00 | II |
| Agregado desagregado | CAD | 3,00 | - |
| Partícula de agregado desagregada/estilhaçada | DAP | 2,00 | II |
| Fissuras na pasta de cimento | CCP | 3,00 | III |
| Fissuras na pasta de cimento e com presença de gel | CCPG | 3,00 | III |

Classificação dos grupos:

Grupo I: fissuras fechadas (abertura $\leq 0,1$ mm) nas partículas de agregados graúdos ou na fração grossa das partículas de areia (1 a 5 mm) (CCA);

Grupo II: trincas abertas (abertura $\geq 0,1$ mm) nas partículas de agregados graúdos ou na fração grossa das

partículas de areia (1 a 5mm), com ou sem produtos de reação (OCA + OCAg);

Grupo III: trincas na pasta de cimento, com ou sem produtos de reação (CCP + CCPG) (Sanchez et al., 2015) adaptado de (Villeneuve, 2011).

O método propõe a classificação das fissuras em grupos. O grupo I apresenta grande variabilidade na contagem de fissuras de acordo com o agregado utilizado, apresentando valores proporcionais ao aumento de expansão. Entretanto, cabe salientar que o processo de britagem dos agregados também acarreta em variações nos resultados, uma vez que a energia aplicada no processo pode induzir à formação de pequenas fissuras internas às partículas de agregado. Por outro lado, os grupos II e III apresentam fissuras abertas que tendem a propagar em direção à zona de transição do agregado com a pasta de cimento. Além das formas de aparecimento de fissuras, é interessante adicionar que a densidade e a quantidade das mesmas por cm^2 , seguem a tendência do aumento em função do desenvolvimento de expansão das amostras de concreto (Sanchez et al., 2015).

Baseados nas diversas observações de DRI, Sanchez et al. (2015) propuseram um modelo interessante que relaciona a expansão do concreto com o desenvolvimento das fissuras geradas pela RAA, como indicado na Figura 4 e exemplificados à seguir. No início da reação físicoquímica (expansões do concreto menores do que 0,05%), fissuras ocasionadas pela RAA, do tipo A ou B, são comumente encontradas dentro das partículas de agregado reativo. Com o progresso da expansão para níveis moderados (aproximadamente 0,12%), novas fissuras continuam a se desenvolverem internamente às partículas reativas. Entretanto, há também um progresso de desenvolvimento das fissuras pré-existent, das quais são capazes de cruzarem a zona de transição e progredir em direção à pasta de cimento. Para altos níveis de expansão (de aproximadamente 0,20%), a maioria das fissuras anteriormente formadas nos agregados tendem a ser encontradas já propagadas dentro da pasta de cimento. Além disso, neste estágio de deterioração, a “lei da mínima energia” tende a governar a progressão de fissuras. Em outras palavras, há uma maior tendência de que as fissuras já existentes continuem a se propagar, ao invés de ocorrer uma contínua geração e aparecimento de novas fissuras. Por fim, em níveis de expansão muito altos (iguais ou maiores do que 0,30%), o quadro fissuratório é visto como muito intenso, uma vez que há uma tendência de interconexão entre as fissuras formadas em diferentes partículas de agregados. Neste ponto, vale ressaltar que as propriedades mecânicas do concreto encontram-se extremamente reduzidas e afetadas, especialmente a resistência à compressão do concreto.

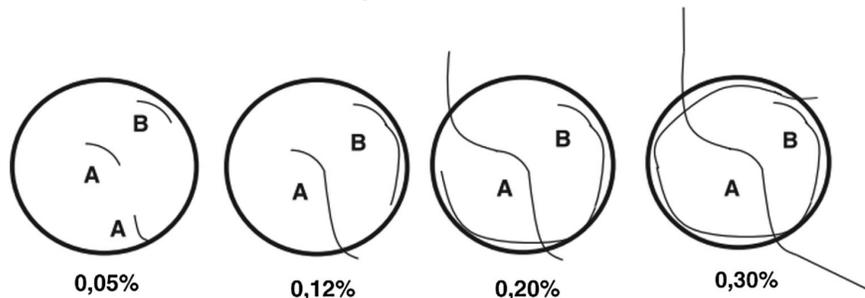


Figura 4. Modelo qualitativo do dano devido a RAA versus níveis de expansão (Sanchez et al., 2015).

3.2.3 Stiffness Damage Test (SDT)

O método SDT foi inicialmente desenvolvido por Walsh (1965), o autor detectou uma interessante correlação entre a densidade de fissuração interna de amostras de rochas e o comportamento tensão/deformação proporcionado através do carregamento cíclico destas. No início dos anos 1990, em pesquisa liderada por Crouch, foi proposto o uso do SDT para a avaliação de amostras de concreto afetadas pela reação álcali-agregado. Em decorrência disso, Chrisp et al. (1993) previram a aplicação de uma carga cíclica fixa (cinco ciclos), de 0 até 5,5 MPa, a uma taxa de 0,10 MPa/s. Os autores indicam que o módulo de elasticidade e a área de histerese (J/m^3) são bons parâmetros para a verificação da RAA, além de não ser um ensaio destrutivo, podendo reutilizar as amostras em outras análises. Os resultados mostram que o módulo de elasticidade diminui, enquanto a área de histerese aumenta devido a deformação plástica gerada, quando a carga cíclica é aplicada (Smaoui et al., 2004a).

Esse método já foi estudado por diversos autores, aos quais visavam identificar características do ensaio que influenciavam nos 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) testaram outras taxas de aplicação de carga como máximas, 5, 10 e 15 MPa, de modo que a carga de 10 MPa mostrou os melhores resultados de modo geral.

Sanchez et al. (2014a), Sanchez et al. (2015a), Sanchez et al. (2017) estudaram a aplicação das técnicas em várias misturas de concreto com agregados diferentes e também em testemunhos extraídos de estruturas acometidas com a RAA. Os resultados apontaram que o uso da carga de

aplicação de 40% da resistência do concreto aos 28 dias mostrou melhor desempenho para diagnosticar o grau de dano da RAA.

Sanchez et al. (2016a e 2017) indicam uma boa correlação entre os ensaios de STD e DRI, pois ambos os testes medem danos causados pela RAA de forma similar podendo se complementar e apresentam as mesmas tendências em relação a expansão.

Os números de SDT expressam as características mecânicas do concreto, ou seja, conforme as expansões causadas pela RAA avançam, as fissuras também aumentam, diminuindo o módulo de elasticidade e a resistência à tração do mesmo (Sanchez et al., 2017). A Figura 5a mostra o ensaio de SDT sendo executado no LaME-UFPR, enquanto a Figura 5b mostra um resultado de saída do ensaio de SDT, onde se identificam os parâmetros denominados Índice de Perda de Rigidez (SDI – stiffness damage index) e Índice de Deformação Plástica (PDI – plastic deformation index). São traduzidos como a relação de energia dissipada sobre a energia total aplicada na amostra, assim como, a relação da deformação plástica sobre a deformação total aplicada no sistema, respectivamente. Por fim, o módulo de elasticidade, bem como o Índice de Não-linearidade (NLI – Non-Linear Index) também podem ser obtidos a partir do ensaio.

No Brasil, esta técnica de avaliação foi divulgada por Sanchez et al. (2017) em um trabalho de colaboração Brasil-Canadá e, atualmente, o Stiffness Damage Test (SDT) está registrado como um documento de Instrução Técnica de FURNAS (Hasparyk e Sanchez, 2021). Este é mais um avanço nacional de modo que as pesquisas brasileiras devem aplicar o SDT com maior frequência nas pesquisas de reações expansivas no concreto.

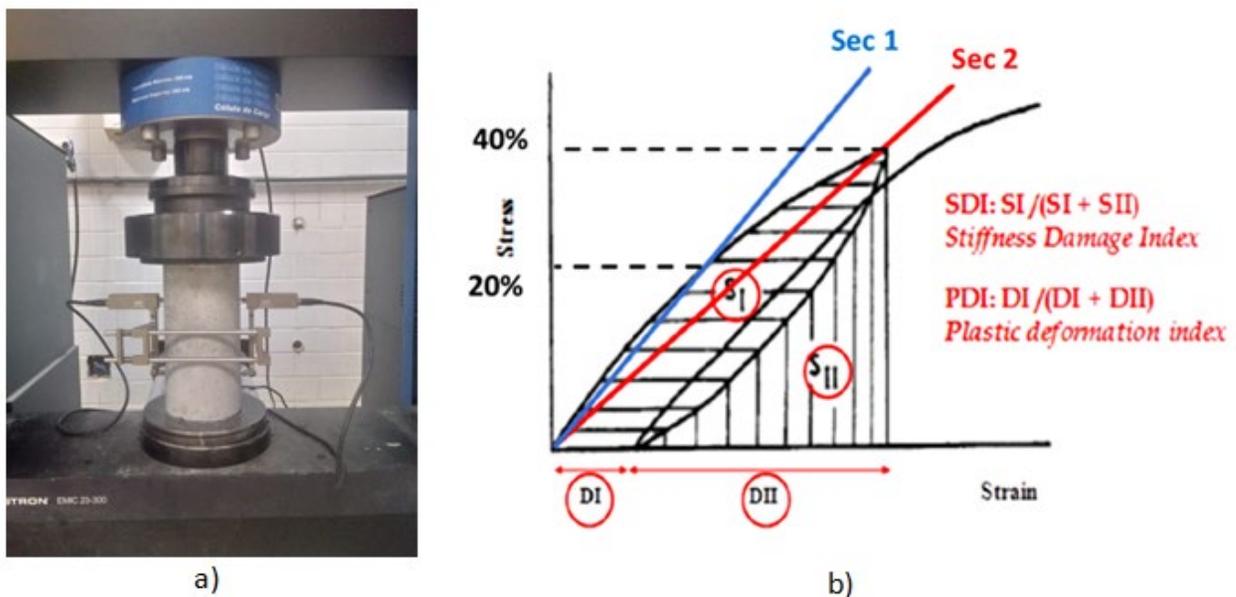


Figura 5. a) realização do ensaio de SDT no Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade Federal do Paraná (LaME-UFPR); b) comportamento tensão-deformação para amostras de concreto afetadas pela RAA (Sanchez et al., 2017)

3.2.4 Método Acelerado das Barras de Argamassa

O método acelerado das barras de argamassa é conhecido na literatura como AMBT (accelerated mortar bar test). No Brasil, este ensaio é normatizado pela NBR 15577:2018 – parte 4 e no Canadá pela CSA A23.2-25A.

Esse é um dos ensaios mais difundidos no mundo e consiste em avaliar a variação de comprimento das barras de argamassa a fim de verificar uma potencial expansão devido a ocorrência da reação alcali agregado em um pequeno espaço de tempo (16 e 30 dias no caso da NBR 15577:2018 – parte 4 e 14 dias no caso da CSA A23.2-25A). Por ser um ensaio acelerado, o mesmo ocorre em

condições severas de exposição (alta temperatura, 80°C, e imersão em solução alcalina de 1N NaOH) o que gera diversas críticas a respeito de seu uso e variações de resultados.

A Figura 6a apresenta os corpos de prova de argamassa que são submetidos ao ensaio de expansão por RAA e a Figura 6b mostra a medida da variação dimensional sendo executada no ensaio AMBT.



Figura 6. a) corpos de prova de argamassa para o ensaio de expansão, b) Ensaio de expansão de argamassa.

Diversos autores utilizam esse método para a avaliação de reatividade em agregados (Fournier e Bérubé, 2000; Thomas et al., 2006; Alaejos et al., 2014; Golmakani; Hooton, 2016) e indicam que o mesmo pode gerar resultados falsos-positivos e falsos-negativos. Agregados que resultam em falsos-negativos podem inicialmente se manifestar como inofensivos mas ao longo do tempo apresentar potencial reativo. E também é possível obter resultados de agregados que podem ser utilizados em concretos sem danos, mas que os resultados do AMBT os descartam gerando falsos-positivos.

Vários pesquisadores buscam aperfeiçoar o método AMBT a fim de sanar os problemas existentes (Shon et al., 2002; Thomas et al., 2006; Sanchez et al., 2011; Alaejos et al., 2014), mas ele segue sendo um ensaio muito criticado devido a suas condições drásticas de aceleração das expansões por RAA, assim como relatam (Thomas et al., 2006; Alaejos et al., 2014; Golmakani; Hooton, 2016; Fournier; Bérubé, 2000).

3.2.5 Método dos Prismas de Concreto

O teste de prisma de concreto ou em inglês Concrete Prism Test (CPT) é geralmente considerado como o melhor indicador de desempenho de campo quando estuda-se a reação álcali-agregado, e consiste na medição de expansões de prismas de concreto submetidos à um ambiente de elevada umidade (95%) à temperatura de 38°C. Porém, o mesmo requer um período de avaliação de um ano para estudos de reatividade de agregados e dois anos para uso de materiais mitigadores da reação (Ideker et al., 2010). O fato de só gerar resultado em um longo prazo é um dos motivos para que muitas pesquisas e empresas tendam a não seguir este método de ensaio, mesmo que seja considerado mais apropriado do que o método AMBT (accelerated mortar bar test). A Figura 7a

mostra os prismas de concreto utilizados para o ensaio de expansão e a Figura 7b mostra o ensaio sendo realizado.

No Brasil, a NBR 15577-6 (2018) estabelece os procedimentos necessários para a avaliação de RAA em prismas de concreto. A mesma é indicada para determinar a potencialidade reativa dos agregados em comparação com concreto com cimento padrão, com adição suplementar de hidróxido de sódio, por um período de 365 dias. Já para avaliação de materiais suplementares ou inibidores de RAA, o período de investigação se estende por 2 anos.

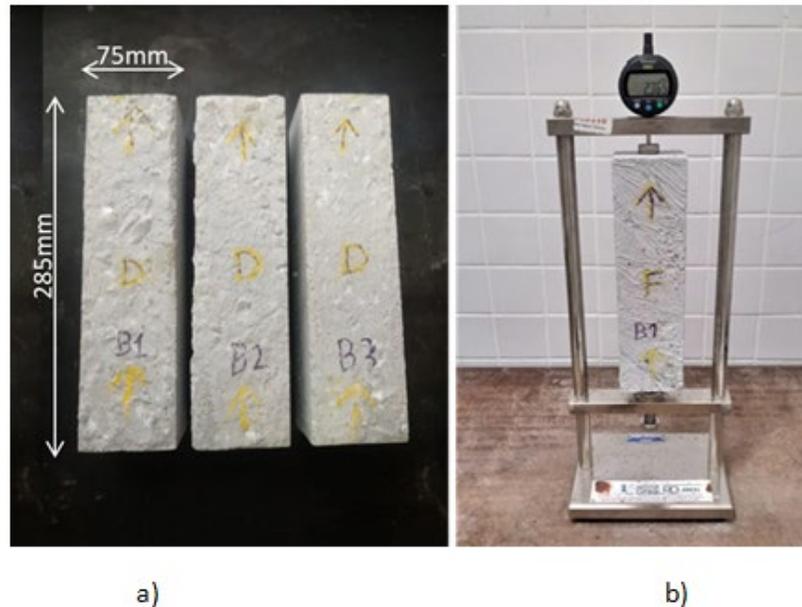


Figura 7. a) Corpos de prova de concreto para ensaio de expansão, b) Ensaio de expansão de prismas de concreto.

Vale destacar que, embora o CPT seja considerado o procedimento de teste existente mais confiável, uma importante desvantagem do método é seu longo período de teste (1-2 anos). Tentando resolver esse problema, procedimentos acelerados de CPT foram propostos na década de 90 (Ranc e Debray, 1992). Entre eles, destacou-se uma versão CPT acelerada (ou seja, ACPT) realizada a 60°C, apresentando resultados promissores em todo o mundo. Verificou-se que resultados confiáveis podem ser alcançados dentro de 3-4 meses ou 6-8 meses para avaliar a reatividade potencial dos agregados ou a eficiência das medidas preventivas, respectivamente. Este método foi padronizado na Europa pela RILEM (Lindgård, 2011), embora na América do Norte e América do Sul não seja atualmente um padrão, pois foram observados alguns problemas relacionados à lixiviação de álcalis e variabilidade importante nos resultados do teste (Kermit, 2017).

A literatura sugere ainda um período de teste de 3 meses para o método ACPT, para determinação da reatividade dos agregados (Degrosbois e Fontaine, 2000; Touma et al., 2001; Fournier et al., 2004) e seis meses para a determinação da eficácia de materiais cimentantes suplementares (Touma et al., 2001). No Brasil, a NBR 15577-7 (2018) indica o uso de testes de prismas de concreto acelerado (ACPT), a qual estabelece a temperatura de 60°C por um período de 140 dias com umidade acima de 95%.

Vale salientar que Sanchez (2008) e Sanchez, Kuperman e Helene (2011) estudaram um outro método acelerado com o objetivo de reduzir os problemas decorrentes de lixiviação que existem no método ACPT e buscar um equilíbrio entre o ambiente interno (corpo de prova) e o externo (solução na qual os corpos de prova ficam imersos), ou seja, utiliza-se uma solução com menos NaOH, temperatura de 80°C e executado por um período de quatro semanas. Ele é chamado de

teste brasileiro de prismas de concreto acelerado ou accelerated brazilian concrete prism test (ABCPT). Os resultados obtidos utilizando este método foram satisfatórios se comparados ao CPT (correlação de 89%).

3.2.6 Comparação entre os métodos avaliação da expansão por RAA

Como foram identificados muitos ensaios de investigação da RAA, alguns normalizados e outros não, alguns mais condizentes com as condições de campo e outros não, nesta seção optou-se por mostrar uma visão geral da frequência de uso dos métodos de ensaio abordados entre os anos de 2000 e 2022. Neste contexto, a Figura 8 apresenta uma comparação de frequência de uso dos tipos de métodos de monitoramento da expansão aplicados para avaliação da RAA. O levantamento foi realizado a partir da pesquisa sistemática de estudos publicados na base de dados WoS e SCOPUS a partir do ano 2000, com mais de 5 citações dos dois países (Brasil e Canadá).

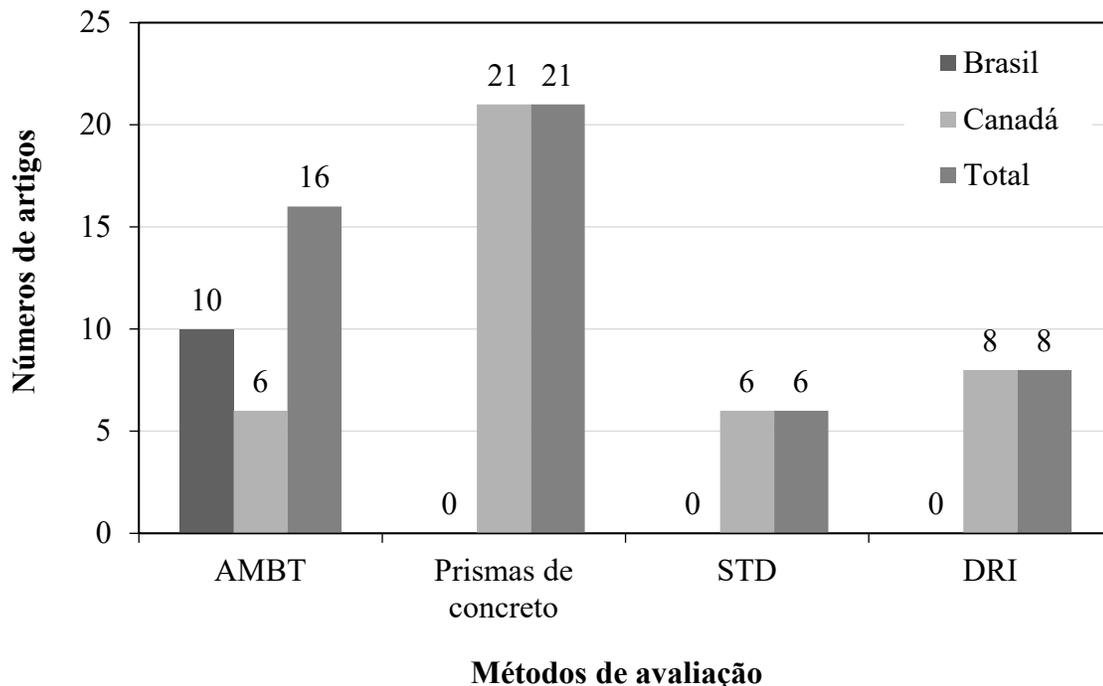


Figura 8. Métodos de avaliação da expansão provocada por RAA aplicados nas pesquisas do Canadá e do Brasil.

Observa-se que o método acelerado de barras de argamassa (AMBT) é o que predomina nos estudos relacionados à RAA no Brasil. Deve-se destacar também que, no Brasil, os outros métodos (prismas de concreto, SDT e DRI) não foram empregados nos artigos consultados no levantamento realizado para esta pesquisa. Este fato é explicado pelo tempo e facilidade de execução da AMBT (resultados em 4 semanas) em comparação com os prismas de concreto (resultados em 1 a 2 anos). Vale ressaltar que essa pesquisa não considera revistas brasileiras com grande relevância no país, assim trabalhos que empreguem outros métodos avaliativos podem ter sido publicados no âmbito nacional. Neste contexto, são importantes a publicação de Sanchez et al. (2017) e do documento de Instrução Técnica de FURNAS (Hasparyk e Sanchez, 2021). Trabalhos recentes e que deverão tornar estes métodos de avaliação de danos por RAA mais aplicados nas pesquisas desenvolvidas no Brasil.

Desse modo, o pouco uso das análises de STD e DRI se deve ao pouco conhecimento e difusão relacionados aos mesmos no Brasil. Além disso, são métodos de avaliação do estado de deterioração em corpos de prova de concreto que não foram encontrados nos artigos do levantamento desta pesquisa, estando os trabalhos publicados provenientes de pesquisas brasileiras baseados apenas em argamassas (ensaio AMBT).

Em contrapartida, no Canadá, o teste dos prismas de concreto é utilizado com maior frequência do que no Brasil. A Figura 8 também evidencia que o SDT e o DRI são ferramentas de mensuração da extensão de danos por RAA usadas com frequência no Canadá. O uso frequente desses métodos (teste de prisma de concreto – CPT, SDT e DRI) nas pesquisas do Canadá é pautado no fato de que o AMBT tem sua confiabilidade duvidosa. Além disso, o SDT e o DRI são úteis para entender a deterioração presente do concreto por RAA e para determinar se a expansão por RAA afetou a estrutura de concreto e suas propriedades mecânicas.

3.3 Panorama das pesquisas de RAA no Brasil

No Brasil, os primeiros estudos registrados abordando o problema da RAA ocorreram em 1963, quando realizou-se a caracterização dos agregados que seriam utilizados na construção da barragem de Jupiá, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. O estudo foi realizado por Gitahy e Ruiz em parceria com o IPT – Instituto de Pesquisa e Tecnologia, e as Centrais Elétricas de Urubupungá S.A. e constatou que os agregados apresentavam em sua composição elementos reativos que poderiam reagir como os álcalis presentes no cimento conforme Stanton havia publicado em 1940 (Lima, 2009; Prizskulnik, 2005).

De acordo com Hasparyk (2005), a partir da descoberta da RAA, várias pesquisas tem se voltado a compreender o processo químico e caracterização de minerais reativos, bem como as causas e consequências em obras afetadas por este processo de deterioração. Haspariryk (2005) indicou que ao menos 19 barragens no Brasil foram identificadas com indícios de RAA, o que compromete a durabilidade das estruturas, além do impacto na economia do país causada pelo mal funcionamento ou suspensão das atividades.

No que se refere a caracterização de materiais, dados levantados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) em 2015, indicam que dos agregados já analisados, 36% apresentam potencial reativo. Além disso, o número de empresas da construção civil que buscam analisar os materiais empregados em suas obras vêm subindo a cada ano, onde a maioria das solicitações refere-se ao estado de São Paulo e Pernambuco (Battagin et al., 2016).

Sobre o estado de Pernambuco, em 2004, ocorreu um marco sobre a ocorrência de RAA no Brasil, que foi a primeira comprovação nacional de RAA em obras de edifícios. Isso ocorreu na Região Metropolitana do Recife (RMR), estado de Pernambuco, com a investigação pericial do desabamento do edifício residencial Areia Branca. As fissuras por RAA se concentravam nos blocos de fundação do edifício Areia Branca, mas vale destacar, que o prédio não desabou pelo processo de deterioração por RAA (Silva et al., 2021). Nos anos seguintes, com os trabalhos de inspeção liderados pelo Dr. Tibério Andrade, Professor da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), diversos edifícios habitacionais foram constatados com os blocos de fundação fissurados por RAA. Estes fatos, resultaram em discussões muito importantes para o meio técnico e científico, de modo que surgiram procedimentos de inspeção e métodos de recuperação desenvolvidos especificamente para a solução destes casos.

A crescente preocupação com o tema tem aumentado o número de estudos relacionados a RAA no Brasil. A Figura 9 apresenta o crescimento de publicações brasileiras relacionadas ao assunto em revistas de alto impacto, nas bases de dados *WoS* e *Scopus*.

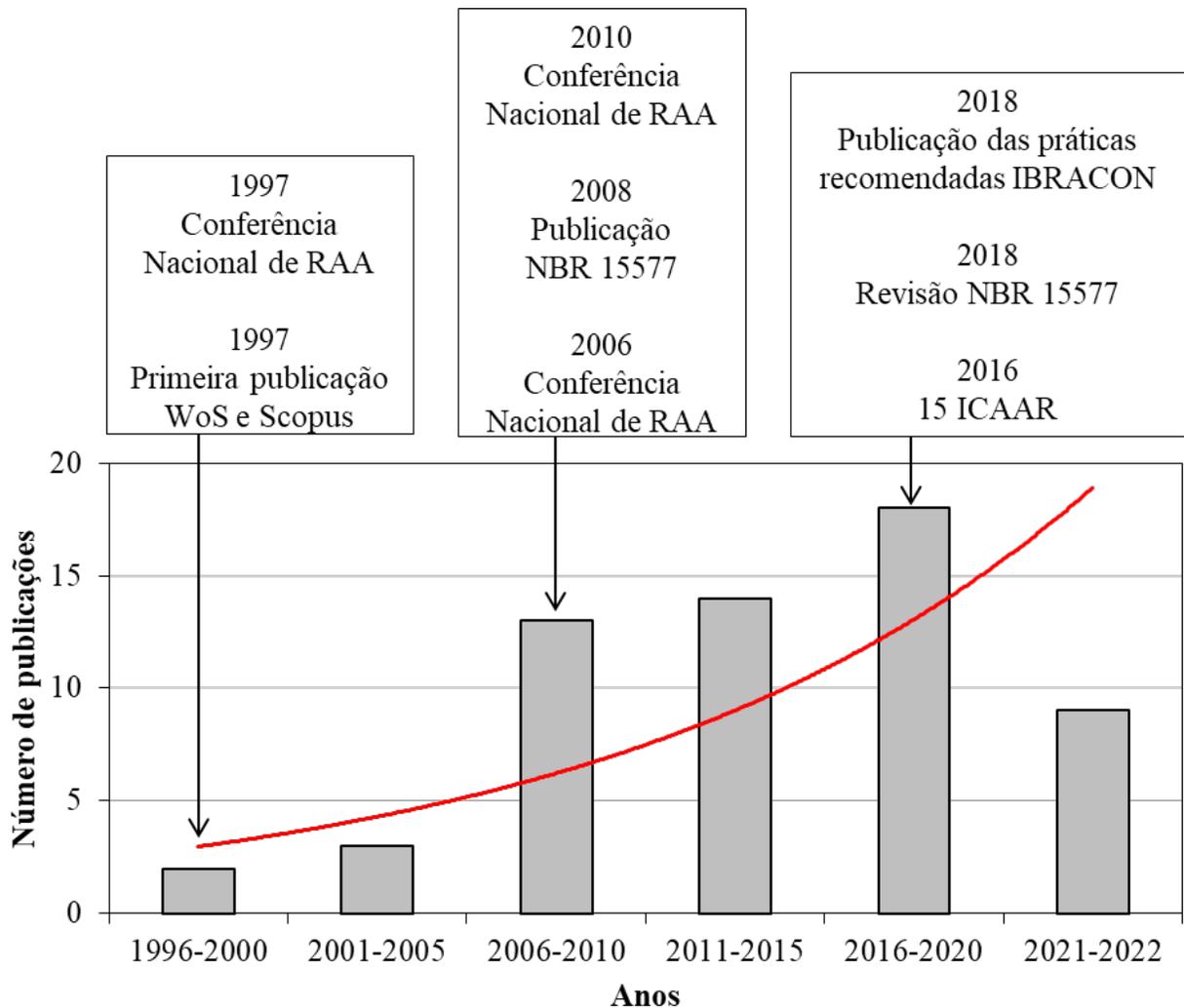


Figura 9. Crescimento das publicações relacionadas a RAA no Brasil em revistas de alto impacto presentes nas bases de dados *WoS* e *Scopus*.

Pode-se observar pela Figura 9 que as publicações relacionadas a RAA no Brasil, além de terem aumentado ao longo dos anos, apresenta um salto a partir 2007. Esse fato coincide com os estudos desenvolvidos para a publicação da norma brasileira regulamentadora em 2008, NBR 15577, que está dividida em 7 partes e refere-se aos procedimentos de ensaios para caracterização de agregados e materiais aglomerantes sujeitos a RAA. A mesma foi revisada e atualizada em 2018.

Concomitantemente a publicação da NBR 15577:2018, houve no país o lançamento do Guia da prevenção da reação álcali-agregado – Práticas Recomendadas do IBRACON (Instituto brasileiro de concreto), em 2018. O trabalho foi desenvolvido pelo Comitê Técnico de Reação Álcali-Agregado do IBRACON, com a coordenação dos pesquisadores Cláudio Sbrighi Neto, Eduardo Quitete e Arnaldo Battagin.

Ao que se refere a atuação do Brasil como sede e organização de eventos no campo de pesquisas sobre RAA, em 1997, ocorreu o I Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, que foi um marco de incentivo para as pesquisas brasileiras sobre RAA. Deve-se destacar, que 1997 coincide também com os primeiros registros das pesquisas brasileiras (publicação de artigos) nas bases de dados internacionais, como se pode notar na Figura 9.

Em 2006, foi realizado o II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto, momento em que o Brasil já estava em um patamar mais elevado nas pesquisas sobre RAA e a constação da reação nos blocos de fundação ocorridos em edifícios de Pernambuco estava em

evidência no Brasil. Deve-se destacar que logo depois deste evento o Brasil lançou a sua primeira norma sobre RAA, a já citada NBR 15577/2008. Também deve-se observar na Figura 9 que a participação dos pesquisadores do Brasil nas publicações em revistas nacionais de alto impacto cresceu muito após o II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto.

Em 2016, ocorreu mais um marco brasileiro sobre as pesquisas de RAA, o Brasil sediou o 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (15^a ICAAR), considerada a conferência mais importante no mundo sobre pesquisas e desenvolvimentos sobre RAA. Este é um mérito dos pesquisadores nacionais e deve-se dar destaque aos editores do anais deste evento Dr. Haroldo de Mayo Bernardes e Dra. Nicole Pagan Hasparyk. A Figura 9 também mostra um aumento da atuação de brasileiros na publicação de artigos em revistas de alto impacto a partir de 2016, quando o ICAAR foi realizado em São Paulo, Brasil.

Desse modo, fica evidente que o Brasil apresenta um importante papel mundial no avanço nas pesquisas relacionadas a RAA, participando e incentivando discussões nacionais e internacionais proporcionadas pelos seus especialistas que discutem os conhecimentos em comites específicos sobre o assunto.

3.4 Abordagens futuras e lacunas do conhecimento

As publicações dos três últimos anos no Brasil e no Canadá, referente ao tema pesquisado, totalizam-se como 19 artigos. Com esses trabalhos realizou-se uma análise de acoplamento bibliográfico, que mede a relação entre dois artigos com base no número de referências em comum citadas (correlações), afim de definir áreas de pesquisas semelhantes que estão em ascensão, assim como indicado no trabalho de Lucas; Garcia-Zorita, Sanz-Casado (2013).

Destes 19 artigos, selecionou-se os que tem pelo menos duas citações das duas bases de dados em estudo e correlacionou-se os temas de pesquisa entre eles, esses trabalhos são apresentados na Tabela 2.

Observa-se entre os trabalhos apresentados dois grandes grupos de pesquisas aos quais se relacionam de acordo com os temas estudados. O maior grupo identificado refere-se ao estudo das reações álcali-agregados de forma geral bem como suas implicações nas estruturas de concreto armado. Dentro desse grupo encontram-se os trabalhos de Campos et al. (2018) e Gorga et al. (2018) com 21 e 26 correlações, respectivamente. Esse grupo indica que a temática relacionada a RAA ainda está em ascensão bem como os diversos parâmetros relacionados aos ensaios e as formas de deterioração observadas com tentativas de modelar o comportamento do concreto com RAA. É importante destacar que os dois trabalhos citados como de destaque neste grupo, Campos et al. (2018) e Gorga et al. (2018), apresentam pesquisadores brasileiros como primeiros autores.

O outro grupo é representado pelos trabalhos de Angulo-Ramirez et al. (2018) com três correlações e Tiecher et al. (2018), com 5 correlações. Estes trabalhos referem-se a reações álcali-agregados em sistemas cimentícios alternativos, como cimentos álcali-ativados e uso de adições pozolânicas. Esse grupo de estudo busca o melhor entendimento quanto à durabilidade de cimentos de baixos teores de clínquer e vem como um tema de maior originalidade com poucas bibliografias disponíveis até o momento e que deve ser mais aprofundado ao longo dos próximos anos. Estes dois trabalhos também apresentam a atuação de brasileiros no desenvolvimento das pesquisas, o que mostra a participação do Brasil na vanguarda das pesquisas sobre RAA.

De forma geral, os trabalhos relacionados a RAA tratam principalmente da caracterização de materiais, formas de mitigação da RAA, métodos avaliativos e identificação de obras com a reação deletéria. Apesar do tema ser recente e a maioria dos trabalhos se referirem as implicações da RAA nas estruturas de concreto, entre as lacunas de conhecimento sobre o tema pode-se citar o estudo dos mecanismos da reação em agregados de origens ígneas vulcânicas e dolomíticas, bem como, a caracterização da RAA em cimentos alternativos. Além disso, destaque deve ser dado para o desenvolvimento de metodologias de recuperação ou contenção dos efeitos causados pela RAA.

Tabela 2. Análise de correlação entre os temas estudados referentes à RAA, no Canadá e no Brasil.

| Temas | Autores | Ano | Citações | Correlações |
|---|-----------------------|------|----------|-------------|
| Cimentos 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 |
| Reação álcali-agregado e implicação estrutural | | | | |
| 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. CONCLUSÕES

A análise realizada a partir da revisão sistemática mostra que o Canadá é o país que mais se destaca na publicação de artigos científicos em periódicos de alto impacto internacionalmente no âmbito da reação álcali-agregado. Também fica evidenciado neste trabalho que o Brasil é o sétimo país neste ranking de classificação. O comparativo entre as pesquisas publicadas de origem canadense e brasileiras indica que o Canadá produz três vezes mais trabalhos de abrangência internacional que o Brasil relacionados ao tema RAA.

Também ficou evidenciado que várias dessas pesquisas canadenses são realizadas em conjunto com autores brasileiros. E a interligação entre citações e autores indicou que os trabalhos realizados entre os dois países se dividem em três grandes grupos de pesquisadores liderados por Fournier, Thomas e Berubè, identificando-se assim a correlação entre os temas estudados.

Sobre as categorias temáticas, identificou-se quatro áreas de pesquisa principais sendo elas: Metodologias de avaliação de RAA, uso de adições cimentantes, reatividade dos agregados, alcalinidade do cimento. O tema com maior número de publicações é o referente as diversas metodologias aplicadas para a avaliação da RAA, liderada pelo canadense Benoit Fournier, com contribuições significativas do brasileiro Leandro Sanchez.

Em relação aos métodos de detecção da RAA, notou-se que no Brasil, o ensaio de prismas de concreto é pouco utilizado nos estudos avaliados, apesar de normatizado. Além disso, as análises de STD e DRI são pouco difundidas no país, porém, existem publicações nacionais dos últimos anos que tendem a mudar este contexto.

Com o critério e procedimento de levantamento bibliográfico aplicado nesta pesquisa, ficou demonstrado que os estudos de RAA desenvolvidos no Brasil são pautados no ensaio AMBT, não sendo detectado o emprego de ensaios mais confiáveis como: teste de prisma de concreto (CPT), Stiffness Damage Test (SDT) e Damage Rating Index (DRI).

Apesar disso, o Brasil apresenta um avanço no número de pesquisas relacionadas a temática da RAA, afim de identificar, mitigar e solucionar as manifestações patológicas decorrentes da mesma. No país existem muitos especialistas dedicados ao assunto, tendo organizado várias conferências específicas sobre RAA, indicando o protagonismo nacional neste campo de pesquisa.

Quanto aos estudos futuros observa-se uma tendência relacionada à RAA e sua implicação estrutural e o efeito da RAA em cimentos alternativos, sem uso de clínquer. Existem esforços em busca do melhor entendimento dos mecanismos da reação em agregados distitos e de materiais inovadores, além de formas de recuperação de estruturas já afetadas pela reação.

O Brasil mostra um aumento das publicações sobre RAA em revistas de alto impacto, ao longo dos anos e mostrou presença preponderante quando se tratou das abordagens futuras e lacuna do conhecimento.

Por meio de um projeto financiado pela Capes e pela Agência Nacional de Águas (ANA), e com a parceria da Universidade de Ottawa (Canadá), o Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) passou a desenvolver pesquisas aplicando os métodos citados. Em um futuro breve, pretende-se divulgar muitas pesquisas incluindo resultados de CPT, SDT e DRI em programas experimentais desenvolvidos no Brasil.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam a sua gratidão às agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pelo apoio financeiro, bem como a Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Departamento de Construção Civil (DCC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), ao Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME), ao Grupo de Patologia e Recuperação das Construções (PRC) e a Agência Nacional de Águas (ANA).

6. REFÊNCIAS

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., Ballivya, 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, Dartmouth, 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). “*Modélisation 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'alcali-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>