

REAÇÕES EXPANSIVAS EM CONCRETOS COM AGREGADOS MINERAIS: UMA REVISÃO

Expansive reaction in concrete with mineral aggregates: a review

Thamires Ohana Coelho Lima^{1*}; Rosane Maria Pessoa Betânio Oliveira¹

¹ Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Av. Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, CEP:49100-000, São Cristóvão-SE, Brasil.

***Autor para correspondência:** thamiresohana14@gmail.com

Recebido em: 03/09/2020, Aceito em: 25/10/2020, Publicado em: 03/11/2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2020.v12.p.165-187>

RESUMO

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um mecanismo de deterioração que gera tensão, levando à formação de fissuras provenientes dos agregados na pasta de cimento. Isso tem levado pesquisadores e engenheiros a estudar e avaliar a causalidade de mudanças relacionadas às propriedades mecânicas do concreto que ocorrem devido à RAA em argamassas e concretos. Com os avanços tecnológicos e experimentais a respeito dos materiais cimentícios, observou-se que o concreto apresenta vulnerabilidade aos processos de deterioração no decorrer da sua utilização, devido a agressividade ambiental e tempo de ocorrência das reações em função do meio em que está inserido. Essas deteriorações são oriundas de diversos fatores, que se classificam em químicos como as reações expansivas e físicos, os efeitos das altas temperaturas, e os diferentes coeficientes de dilatação térmica dos agregados e da pasta de cimento endurecida. A RAA ocorre pela interação química dos constituintes do concreto, onde a sílica presente no agregado interage com os íons alcalinos pertinentes à pasta, na presença de umidade. O produto desta reação é um gel sílico-alcalino, frequentemente visível na interface pasta/agregado e nos poros do concreto, com característica expansiva. Uma vez identificada a presença da RAA, sua interrupção, bem como a recuperação da estrutura afetada gera um custo elevado. Assim, este artigo tem por finalidade apresentar os principais resultados de trabalhos executados na área, foram usados pelos autores um conjunto de ensaios e testes que podem ser usados para avaliar e identificar a reatividade dos agregados usados e métodos para mitigar os efeitos da RAA em concretos e argamassas.

Palavras-chave: reação álcali-agregado, agregados, expansão, mitigação, concreto.

ABSTRACT

The Alkali-Aggregate Reaction (RAA) is a deterioration mechanism that generates tension, leading to cracks' emergence from the aggregates in cement paste. This has led researchers and engineers to study and evaluate the reason of changes related to the mechanical properties of concrete that occur due to RAA in mortars and concretes. With the technological and experimental advances regarding cementitious materials, it was observed that the concrete presents vulnerability to the deterioration processes during its use, due to environmental aggressiveness and to time of reactions, depending on the environment in which it is inserted. These deteriorations come from several factors, which are classified in chemicals, such as expansive, and physical reactions, the effects of high temperatures, and the different coefficients of thermal expansion of the aggregates and the hardened cement paste. RAA occurs through the chemical interaction between concrete's constituents, where the silica present in the aggregate interacts with the alkaline ions pertinent to the paste, in the presence of humidity. The product of this reaction is a silica-alkaline gel, often visible at the paste / aggregate interface and in the concrete pores, with an expansive characteristic. Once the presence of the RAA is identified, its interruption, as well as the recovery of the affected structure, demands high cost. Thus, this article aims to present the main results of works performed in the area, a set of tests and tests were used by the authors that can be used to evaluate and identify the reactivity of the aggregates used and methods to mitigate the effects of RAA in concrete and mortars.

Keywords: alkali-aggregate reaction, aggregates, expansion, mitigation, concrete.

INTRODUÇÃO

O termo patologia é utilizado quando se observa um desvio daquilo que era adequado e, por alguma eventualidade, seja natural ou artificial, passou a não ser mais. Na indústria da construção, ramo de maior tendência da engenharia civil, "patologia" denota o mesmo sentido e, quando aplicado ao estudo do concreto é caracterizado pela perda de sua durabilidade, desempenho e vida útil (HELENE, 1992).

Segundo a Norma Brasileira (NBR) 15577-1 (ABNT, 2018) a RAA é uma reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila (OH^-) associados com os componentes alcalinos sódio e potássio provenientes do cimento Portland ou outras fontes, com certas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos, que, sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa.

A perda de durabilidade do concreto se manifesta pela sua deterioração, que pode acontecer tanto por fatores externos quanto internos, sendo essas reações de origem física, química ou mecânica (NEVILLE, 2016). Os danos mecânicos são aqueles resultantes de impactos, erosão, abrasão, entre outros, porém as causas químicas são relacionadas a reações cimento/agregado, como as Reações Álcali-Sílica (RAS) e Reações Álcali-Carbonato (RAC), e estão relacionadas a ataques químicos externos em meios agressivos, como cloretos e sulfatos.

Para que ocorra RAA é indispensável que haja concentrações de hidróxidos alcalinos suficientes na solução dos poros do concreto para reagir com o agregado, agregados reativos, e umidade suficiente (PRISZKULNIK, 2005; FUSCO, 2008; MEHTA & MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016), sendo que na ausência de qualquer um destes, a RAA não acontece. Além destes, devido à complexidade física e química das reações, alguns fatores como teor de álcalis do cimento, contaminação da água de amassamento, as condições do meio, como temperatura e umidade, tensões de compressão e a idade do concreto podem catalisar a RAA (PRISZKULNIK, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008; HASPARYK, 2011; RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

A RAS ocorre, basicamente, em duas etapas, a primeira delas é a reação química em si, onde há a formação do gel, e a segunda é a expansão do mesmo. Sendo este um dos maiores problemas da RAA, pois o inchaço do gel gera tensões internas que causam microfissuramento do concreto e posterior queda das resistências mecânicas, afetando diretamente o desempenho e a durabilidade do material (RAJABIPOUR *et al.*, 2015). Os principais indícios da RAA são a presença de manchas esbranquiçadas, exsudação do gel e formação de fissuras em formato de mapa na superfície do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

A influência da RAA é um assunto complexo, que baseia a justificativa de um estudo preliminar dos agregados a serem empregados na confecção do concreto constituído por um rol de ensaios laboratoriais que visam avaliar a potencialidade reativa dos agregados graúdos, principalmente naqueles utilizados em obras que necessitam de um grande volume de concreto (NEVILLE, 2016).

A problemática da RAA, em casos avançados, é que o concreto tende a perder resistência mecânica, surgem fissuras e a vida útil estrutural é minorada (MEHTA & MONTEIRO, 2008). Com base nisso, a realização desta pesquisa justifica-se pela notoriedade do estudo da RAA decorrente de agregados reativos, visando apresentar resultados potencialmente relevantes quanto à possível solução da ocorrência da RAA em estruturas de concreto.

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

A ocorrência da expansão por RAA, até anos atrás, era de principal incidência em obras de grande porte, como barragens e partes de usinas hidrelétricas. Porém já se tem estudos de ocorrência de RAA em blocos e sapatas de fundações de edifícios com idades de 3 a 20 anos de construção (OTOCH, 2016; HELENE *et al.*, 2016; FONSECA *et al.*, 2018).

A RAA é um mecanismo de degradação originado pela interação entre os álcalis e íons hidroxilas da pasta de cimento hidratado dissolvidos nos poros do concreto com minerais presentes na constituição de alguns agregados (ABNT, 2018). Segundo Mehta e Monteiro (2008) a RAA é uma reação lenta, que ocorre em estruturas de concreto, formada pela reação entre alguns minerais que compõem os agregados e hidróxidos alcalinos, oriundos do cimento. Conforme Prizskulnik (2005) é um processo químico em que alguns constituintes minerais do agregado reagem com hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados e materiais pozolânicos) que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Como produto desta reação, forma-se um gel higroscópico expansivo.

Segundo Neville (2016), este gel tem características de “expansão infinita”, por ser higroscópico, tendo assim tendência de atrair moléculas aquosas, com tendência a aumento de volume. Além disso devido ao gel estar confinado pela pasta de cimento hidratado, acarreta o surgimento de pressões internas, que tentem a microfissurar a matriz hidratada. A manifestação da RAA pode se dar de várias formas, desde expansões, movimentações diferenciais na estrutura e fissurações, exsudação de gel e redução das resistências mecânicas à compressão e tração (MEHTA & MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2016).

Os álcalis podem ser oriundos de fontes externas, como soluções de cloreto de sódio e sulfato de sódio, produtos químicos para limpeza e industriais, além daqueles presentes nas adições e nos agregados, como por exemplo nos feldspatos alcalinos, como os potássicos (KAlSi_3O_8) e os sódicos ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) (HASPARYK, 2011). Os álcalis do cimento geralmente são oriundos da calcinação dos compostos silicosos e das argilas utilizadas para a produção do clínquer, sendo que estes se encontram ligados aos sulfatos, silicatos e aluminatos (HASPARYK, 2011; RAJABIPOUR *et al.*, 2015). Pelas altas temperaturas empregadas nos fornos de fabricação de clínquer, os íons K^+ e Na^+ passam por um processo de vaporização, onde grande parte condensa-se na superfície do clínquer sendo que uma menor fração permanece no interior das partículas. Estes álcalis ainda podem estar ligados a hidroxilas (NaOH e KOH), apresentando fácil solubilidade em água (RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

Colapsos repentinos devido a RAA são raros, uma vez que essas manifestações geralmente apresentam sintomas perceptível e pode ser corrigido ao longo da vida útil da estrutura ou até que um dos reagentes seja consumido ou a umidade seja reduzida (TAYLOR, 1997).

TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), existem dois tipos de reação álcali-agregado em função dos tipos de minerais presentes nos agregados, sendo elas: Reação Álcali-Sílica (RAS) e Reação Álcali-Carbonato (RAC). Das duas reações, a que ocorre mais rapidamente é a RAS, devido à baixa cristalinidade dos compostos a base de sílica envolvidos neste tipo de reação.

A estrutura da RAS envolve várias etapas segundo Prizskulnik (2005). Estas são os ataques ao agregado, a expansão do gel, a evolução da fase líquida intersticial e as difusões iônicas. O ataque aos agregados é resultado do processo físico, onde ocorre a migração dos íons Na^+ , K^+ e OH^- da fase líquida do interior, para as partículas de sílica reativa, e um processo químico, envolvendo reações com o agregado e a formação de um gel silicato alcalino (PRISZKULNIK, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2008; ABNT, 2018).

A sílica (SiO_2) é composta por um arranjo tridimensional tetraédrico, formada por um átomo central de Si ligado a quatro átomos de oxigênio, que formam o grupo siloxano ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$), conforme ilustra a Figura 1. O ângulo de ligação O-Si-O é fixado em 109° , mas essa ligação entre os tetraedros SiO_2 pode variar de 100° a 170° . Assim, existe uma grande quantidade de estruturas de sílica que podem ser macro-cristalinas, micro/nano-cristalinas, ou amorfas (RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

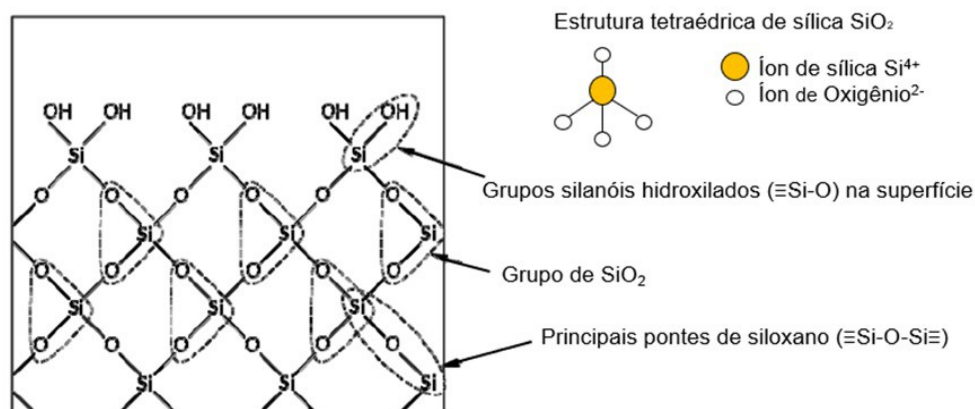


Figura 1. Estrutura da sílica. Fonte: Adaptado de THOMAS *et al.* (2013).

A RAC é diferente da RAS pois não apresenta formação de gel expansivo, todavia, é caracterizada por reações de desdolomitização, gerando enfraquecimento da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, causando fissurações (FUSCO, 2008).

Os fatores que influenciam a ocorrência da RAA em estruturas de concreto é o cimento com teor suficiente de álcalis, agregado reativo e umidade. Caso não tenha um destes componentes a RAA não ocorre (PRISZKULNIK, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2008; FUSCO, 2008). Neville (2016), enfatiza que outro fator que influencia o processo da RAA é a permeabilidade da pasta de cimento hidratada, devido ao controle que ela exerce sobre a entrada de vários íons e a movimentação de água bem como do gel. Para a prevenção e neutralização do RAA, é necessário adotar algumas medidas, como a escolha de agregados não reativos, o uso de adições minerais e adições químicas (PRISZKULNIK, 2005).

ENSAIOS PARA AVALIAR A RAA

Para identificar e analisar os efeitos da RAA é necessário realizar alguns ensaios de laboratório. Alguns autores usaram um conjunto de métodos de ensaios, como análise petrográfica por microscopia óptica (RAMOS *et al.*, 2014; NETO *et al.*, 2014; TIECHER *et al.*, 2018; MUNIR *et al.*, 2018; TIECHER *et al.*, 2018; ABBAS *et al.*, 2019) e pela ASTM C295 (ABBAS, 2019), para identificar a presença de fases minerais reativas. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) combinada com Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) (NETO *et al.*, 2014; SACHLOVA *et al.*, 2017; LEEMANN, 2017; SLAWETA, 2017; TIECHER *et al.*, 2018; MUNIR *et al.*, 2018; TIECHER *et al.*, 2018; LEEMANN & MUNCH, 2019; SLAWETA & SWIT, 2019; YAZICI *et al.*, 2019; ABBAS *et al.*, 2019), para avaliar a mudança na composição dos cristais de quartzo após o ataque alcalino. Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX) (NETO *et al.*, 2014) e Difração de raios X (DRX) (NETO *et al.*, 2014; TIECHER *et al.*, 2018; ABBAS *et al.*, 2019), para identificação das fases mineralógicas nos agregados. Ressonância Magnética Nuclear (RMN) (TIECHER *et al.*, 2018), para avaliar o potencial de dissolução de sílica nas amostras de quartzo, bem como alterações em sua escala atômica, antes e após a reação com hidróxidos alcalinos. Fluorescência de raios X (FRX) (TIECHER *et al.*, 2018; TIECHER *et al.*, 2018; ABBAS *et al.*, 2019)

para caracterizar as rochas usando análise química. Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) (TIECHER *et al.*, 2017), com intuito de caracterizar o grau de deformação dos grãos de quartzo. Medidas de sílica dissolvida de acordo com norma ASTM C 289 (NETO *et al.*, 2014; TIECHER *et al.*, 2017; ABBAS *et al.*, 2019). Método do Espectrofotômetro Visível (UV) segundo a NBR 9848 (TIECHER *et al.*, 2017; TIECHER *et al.*, 2018). Medidas de expansão nas barras de argamassa de acordo com o método acelerado descrito na NBR 15577-4 (NETO *et al.*, 2014), pelas normas da ASTM C 1260 (MURLIDHAR, *et al.*, 2016; RAMOS *et al.*, 2016; TIECHER *et al.*, 2017; MUNIR *et al.*, 2018; TIECHER *et al.*, 2018; ABBAS *et al.*, 2019), ASTM C 227 (ABBAS *et al.*, 2019), ASTM 1293 (MUNIR *et al.*, 2018) e pela diretriz suíça SAI 2042 (LEEMANN & MUNCH, 2019). Método da União Internacional de Laboratórios e Peritos em Materiais de Construção (RILEM) (RAMOS *et al.*, 2014; JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA *et al.*, 2019; YAZICI *et al.*, 2019) para avaliar a reatividade dos agregados. Análise Termogravimétrica (TGA) (SLAWETA, 2017; ABBAS *et al.*, 2019) e Análise Térmica Diferencial (DTA) (ABBAS *et al.*, 2019) para avaliar a atividade pozolânica.

ESTUDOS REALIZADOS EM OUTROS PAÍSES

O primeiro a realizar um estudo sobre RAA foi Stanton (1940), onde foram feitas análises sobre a deterioração provocada pela RAA na barragem de Parker Dam - EUA, construída entre 1934 e 1938, e constatou a reatividade de certas fases dos agregados com os álcalis do cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Murlidhar *et al.* (2016), estudaram a reatividade potencial de sílica alcalina de cinco tipos de rochas ígneas do Estado de Johor na Malásia. Foram coletas seis amostras, sendo que uma das amostras foi coletada em uma zona de falha. Os autores realizaram exames petrográficos e teste acelerado de barra de argamassa segundo a ASTM C 1260.

Como resultado apenas uma das amostras foi considerado reativo com taxa média de expansão de 0,2404% (mais de 0,2%). Os autores enfatizaram a importância de ser evitado esse tipo de agregado no concreto. Já as demais amostras foram consideradas como inócuas devido à suas taxas de expansão inferiores a 0,1% em 14 dias (MURLIDHAR, *et al.*, 2016).

Ramos *et al.* (2016), realizaram uma pesquisa sobre a reatividade potencial de rochas graníticas. O objetivo principal dos autores foi realizar análises petrográficas dos agregados versus testes de expansão de barra de argamassa e prisma de concreto. A pesquisa se desenvolveu a partir de um projeto chamado IMPROVE que surgiu da necessidade de diagnosticar com precisão a potencial reatividade dos granitos aos álcalis, onde cerca de 40 granitos diferentes já foram estudados e o trabalho apresenta o resultado de oito tipos de rochas do norte e centro de Portugal.

A avaliação dos agregados graníticos foi realizada por meio de análise petrográfica, seguida de ensaios de expansão acelerada, a saber, o teste de barra de argamassa acelerada a 80°C e os ensaios de prisma de concreto a 60°C e 38°C. Aproximadamente 100 kg de agregados esmagados de diferentes tamanhos foram coletados de cada pedreira e amostras manuais foram selecionadas (RAMOS *et al.*, 2016).

A avaliação da reatividade potencial aos álcalis seguiu a metodologia de RILEM AAR-1.1, que classifica a reatividade em três classes (classe I - muito improvável que seja reativa a álcali; classe II: reatividade alcalina incerta; classe III: muito provável que seja reativa a álcalis) e foi baseado na quantificação de quartzo microcristalino (< 100 µm), incluindo a presença de mirmequitos e na

medição do ângulo de extinção ondulatória de cristais de quartzo de acordo com o procedimento descrito em DeHills e Corvalán, seguindo a classificação expressa na especificação LNEC E 415 (LNEC - Laboratório nacional de engenharia civil, sediada em Portugal). Já avaliação por meio de teste de expansão acelerado os agregados foram esmagados, peneirados e pesados de acordo com os requisitos da norma ASTM C 1260, RILEM AAR-4.1 e RILEM AAR-3. Para a interpretação dos resultados pelo método da ASTM 1260, os critérios de RILEM AAR-0 e Santos Silva e Braga Reis foram utilizados, já para o método de AAR-4.1, os critérios de RILEM AAR-0, Lindgard et al. e LNEC E 461 foram utilizados. E por fim para o método de RILEM AAR-3, os critérios de RILEM AAR-0 e LNEC E 461 foram utilizados (RAMOS *et al.*, 2016).

Na análise petrográfica três dos agregados foram classificados como potencialmente reativos e os outros foram classificados como não reativo. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas diferentes metodologias utilizadas para a avaliação da reatividade potencial dos agregados graníticos (RAMOS *et al.*, 2016).

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos na pesquisa.

MÉTODO	CRITÉRIO	AGREGADOS							
		1	2	3	4	5	6	7	8
CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	RILEM ARR-A.1	Clas. II	Clas. II	Clas. I	Clas. I	Clas. I	Clas. II	Clas. I	Clas. I
	LNEC E 461	Clas. II	Clas. II	Clas. I	Clas. I	Clas. I	Clas. II	Clas. I	Clas. I
	Quartzo Micro-cristalino	2,4	21,7	1,0	0,1	1,5	4,8	1,4	1,2
	Extinção Ondulatória	Mod.	Mod.	Mod.	Fraco	Mod.	Mod.	Mod.	Mod.
ASTM C 1260	RILEM AAR-0	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Santos Silva e Braga Reis	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
RILEM AAR-4.1	LNEC E 461	NR	PR	PR	NR	PR	PR	NR	PR
	RILEM AAR-0	NR	PR	NR	NR	PR	NR	NR	PR
	Lindgard <i>et al.</i>	NR	PR	PR	NR	PR	PR	PR	PR
RILEM AAR-3	RILEM AAR-0 e LNEC E 461	NR	PR	NR	NR	NR	NR	NR	NR

Clas. (Classe); NR (não reativo); PR (potencialmente reativo). Extinção ondulatória: Fraca - (0° - 14°); Moderado (Mod.) - (15° - 24°); Forte - (25° - 35°). Fonte: RAMOS *et al.* (2016)

A partir dos resultados da caracterização petrográfica dos agregados graníticos e os diferentes ensaios de expansão a que foram estudados, é possível concluir que o ângulo de extinção ondulatório deve ser usado apenas como um possível indicador de RAS e não como uma ferramenta de diagnóstico; além da quantificação do quartzo microcristalino, a presença de microfissuras deve ser considerada na avaliação dos agregados; existe a possibilidade de que outros minerais, além do quartzo, possam participar do desenvolvimento da RAS e, portanto, a avaliação do grau de intemperismo pode ser importante; ASTM C 1260 nunca deve ser usado somente na avaliação de agregados de reação lenta; a extensão do período de teste até 100 dias usando uma expansão de

limiar de 0,20%, é sugerida; e o RILEM AAR-4.1 é o teste que detecta um número maior de agregados potencialmente reativos. O uso do critério em Lindgård et al. é sugerido como o mais adequado para este tipo de agregados (RAMOS *et al.*, 2016).

Um estudo realizado por Sachlova *et al.* (2017), quantificaram o potencial de RAS de agregados ricos em quartzo de algumas regiões da República Checa na Europa, os autores fizeram uma comparação de testes químicos, teste de barra acelerada de argamassa e usaram as técnicas do MEV combinada com análise de imagem petrográfica (Figura 2). Os autores encontraram uma boa correlação entre os resultados do teste de barra de argamassa e o MEV. Porém não foi encontrada correlação entre o teste de barra de argamassa e o teste químico. Os resultados não esperados do teste químico poderiam estar ligados a presença de minerais não quartzo no agregado.

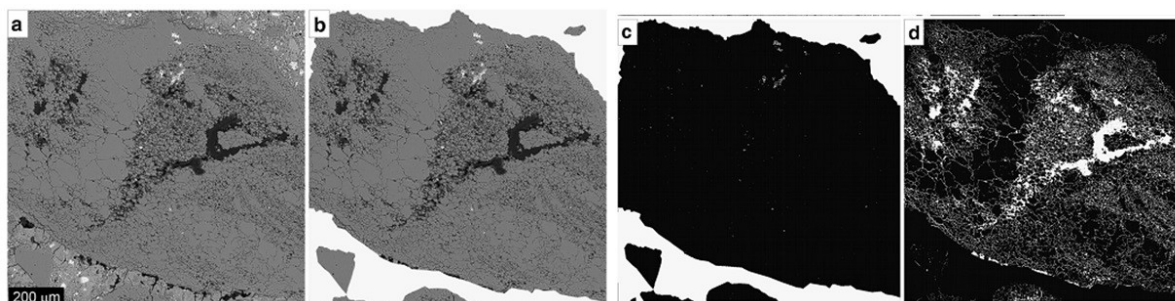


Figura 2. MEV combinada com análise de imagem petrográfica: (a) Visão geral da superfície da barra de argamassa após o ensaio acelerado. (b) Seleção de partículas agregadas. (c) Quantificação de área exibindo valor de escala de cinza 255 (pasta de cimento e acessório minerais em partículas agregadas). (d) Quantificação de área exibindo valor de escala de cinza 0-70 (microfissuras, lacunas e recursos conectados a RAS). Fonte: SACHLOVA *et al.* (2017).

Leemann (2017), aplicou a microscopia Raman em produtos de RAS cristalinos formados em duas estruturas danificadas de Dubendorf na Suíça, uma delas era de uma ponte de concreto que foi construída em 1969 e outra construída em 1980 e foi confeccionado uma mistura padrão para o teste de prisma, permitindo uma comparação de seus espectros e com isso sua microestrutura. Foi usado o MEV combinado com EDS para avaliar a composição química das amostras estudadas.

Os espectros Raman do produto da RAS cristalino obtidos foram todos semelhantes (Figura 3), demonstrando assim que é sempre o mesmo estágio, isso devido à similaridade na composição química, sendo fortes indícios de que os produtos RAS cristalino é uma fase característica formada em concreto com agregados de reação lenta (LEEMANN, 2017).

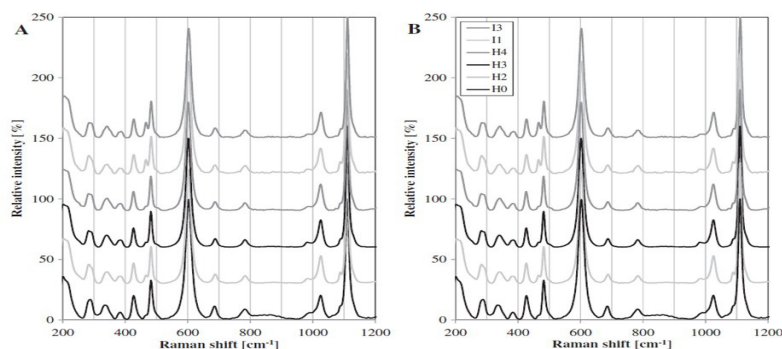


Figura 3. Espectros Raman dos produtos RAS cristalinos: (A) em diferentes locais em um agregado de concreto e (B) de seis diferentes agregados em concreto. Fonte: LEEMANN (2017).

Outro estudo realizado por Beauchemin *et al.* (2018), avaliaram o potencial RAA de agregados de concreto reciclado pelo método do teste de prisma de concreto. O teste foi realizado em dois diferentes tipos de concreto reciclados: fabricados a partir de blocos com mais de 17 anos dispostos ao ar livre e a partir do viaduto de Du Vallon - Charest (Canadá) demolido em 2010. Os blocos de concreto que incorporam o agregado mostraram grande expansão (0,563%) ao longo de 17 anos, o que provavelmente utilizou sílica reativa dentro das partículas de agregados naturais. Os autores recomendam usar o agregado reciclado saturado, pois expansões mais altas são frequentemente obtidas quando usando agregados nessas condições. Portanto, representando com mais precisão o potencial RAA do agregado.

Munir *et al.* (2018), estudaram a RAS do concreto com uso de cinco agregados de pedreiras diferentes do Paquistão. A expansão da barra de argamassa para esses agregados foi testada de acordo com as diretrizes da ASTM C 227 e ASTM C 1260, realizaram também o teste de resistência a compressão e flexão, para verificar a perda de resistência devido a RAS. A técnica do MEV confirmou que dois agregados eram reativos. A análise petrográfica dos agregados confirma a presença de minerais reativos (3-77%). Porém, os minerais reativos foram considerados ser apenas lentamente reativo. Os autores sugeriram para trabalhos futuros o uso do teste de prima de concreto segundo a ASTM 1293 para melhor comparação dos resultados. A Figura 4 apresenta imagens MEV de barra de argamassa incorporando agregados sob condições de exposição da ASTM C1260.

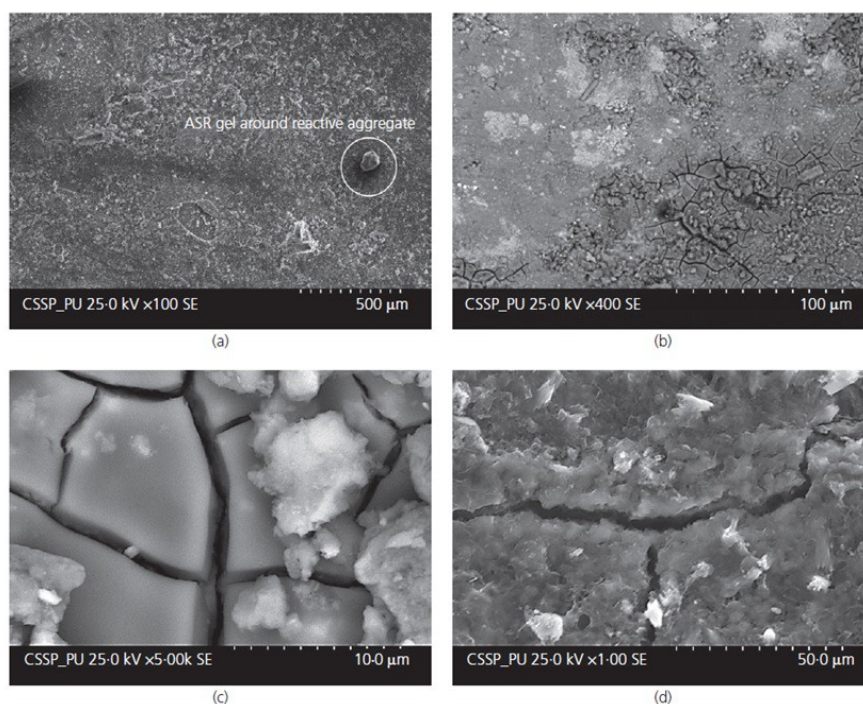


Figura 4. Imagens MEV: (a) presença de gel de ASR em torno da partícula de agregado reativo, (b) rachadura observada nas barras de argamassa em torno de agregados reativos, (c) e (d) rachaduras devido a RAS. Fonte: Munir *et al.* (2018).

Jóźwiak-Niedźwiedzka *et al.* (2019), realizaram um estudo para verificar a reatividade dos agregados de rochas ígneas, extraídas da região sudoeste da Polônia. Foram analisados cinco agregados por meio dos métodos da ASTM e RILEM, mutuamente complementar ao procedimento contido na Direção Geral de Estradas e Auto-Estradas Nacionais (GDDKiA).

Com base no teste de barra de argamassa e na expansão do prisma de concreto, as rochas ígneas foram classificadas da seguinte forma: basalto, gabro e granito (não reativa), pórfiro e meláfiro (moderadamente reativo), conforme Figura 5. Quantidades significativas de minerais reativos: calcedônia e tridimita (meláfiro) e microcristalina quartzo e vidro vulcânico (pórfiro) ocorreram no grão dos agregados produzidos a partir de pórfiro e meláfiro (JÓŻWIAK-NIEDŹWIEDZKA *et al.*, 2019).

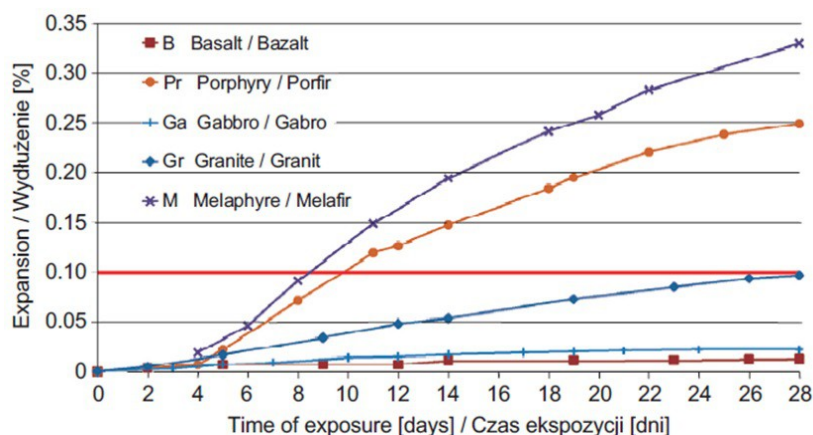


Figura 5. Expansão de corpos de prova com agregados de rochas ígneas em função do tempo de exposição em solução de NaOH 1N a 80 °C. Fonte: JÓŻWIAK-NIEDŹWIEDZKA *et al.* (2019).

Leemann e Munch (2019), adicionaram cério ao concreto para identificar e visualizar a formação do produto da RAS por meio do MEV combinado com EDS. três misturas de concreto são produzidas usando agregados suscetíveis a RAS. O agregado usado é originário de um depósito aluvial no sudoeste da Suíça constituído por gnaiss e quartzito. Foi utilizado o teste de prisma de concreto de acordo com a diretriz suíça SIA 2042. A análise EDS mostra que o cério é realmente incorporado ao produto da RAS. Isso resulta em um coeficiente de retrodifusão aumentado com brilho mais alto no MEV, o que facilita a identificação do produto da RAS. Os autores concluíram que o cério está ligado aos produtos da RAS, o que aumenta o contraste de retroespalhamento em MEV. Isso permite a fácil e clara identificação dos produtos da RAS e permite compreender a sequência da RAS em diferentes estágios (Figuras 6 e 7).

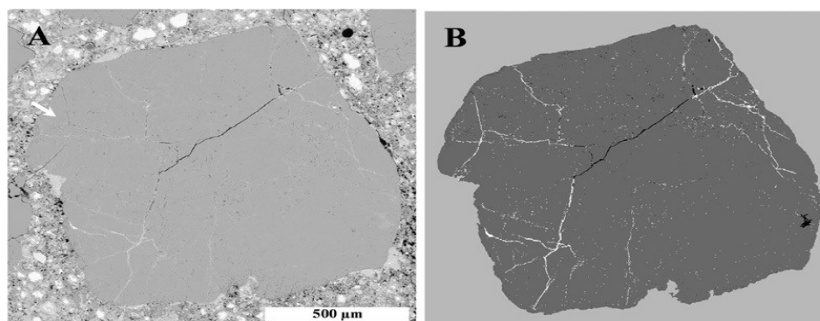


Figura 6. Agregado em concreto C-Cs: (A) com segmentação de fase com base no mapeamento do elemento EDS (B): produtos RAS (branco), pasta de cimento (cinza claro), agregado (escuro cinza) e rachaduras / poros no agregado (preto). A seta branca em (A) indica a localização do recurso mostrado na Figura 7. Fonte: LEEMANN & MUNCH (2019).

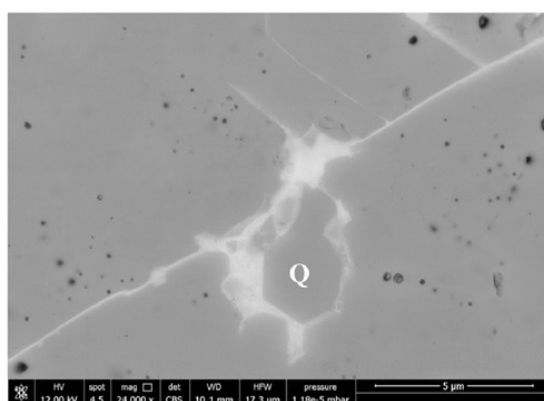


Figura 7. Produtos ASR em quartzito ao longo dos limites de grãos minerais, pequenas rachaduras e porosidade criada pela dissolução com grão de quartzo único não dissolvido (Q). A localização do grão de quartzo único (Q) é indicada pela seta branca na Figura 6A. Fonte: LEEMANN & MUNCH (2019).

ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL

No Brasil, tomou-se conhecimento da reação patológica devido a RAA em 1985, nas barragens de Apolônio Sales, antigo Moxotó (Delmiro Gouveia - AL) e Joanes II (Dias d'Ávila - BA), as duas barragens apresentavam condições favoráveis para a mitigação da RAA, principalmente pela falta de desconhecimento da natureza do agregado utilizado para a produção dos concretos (BATTAGIN *et al.*, 2016).

Neto *et al.* (2014), realizaram um estudo sobre a influência de agregados graníticos do nordeste do Brasil na RAA, sendo caracterizado três agregados graníticos grossos que foram coletados nos municípios de Itabaiana (amostras A e B) e Itaporanga D'ajuda (amostra C), no centro-sul do estado de Sergipe. Foi estudado a evolução de expansão em argamassas pelas técnicas de MEV combinada com EDS, DRX e EDX, e por fim os autores correlacionaram a análise

petrográfica com a cinética de dissolução de sílica. As medidas de expansão nas barras de argamassa foram realizadas de acordo com o método acelerado descrito na NBR 15577-4 e as medidas de sílica dissolvida foram as descritas na norma ASTM C 289.

Os resultados obtidos após análises mostraram que os três agregados continham cerca de 70% Si, 17% Al e menores quantidades de Na, K, Ca, Fe e Mg. Já os resultados de DRX foram semelhantes para as três amostras, com os principais picos correspondentes ao quartzo (SiO_2), microclima (feldspato de potássio, KAlSi_3O_8) e plagioclásio ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ e CaAl_2Si_2). Os resultados da determinação da sílica dissolvida após aquecimento em uma solução de NaOH revelaram que a amostra C apresentou dissolução mais rápida até 96 horas de exposição (2,5 vezes maior do que para as outras amostras), com obtenção de equilíbrio dentro de 192 horas de tratamento. A dissolução das amostras A e B atingiu níveis semelhantes aos da amostra C após 192 horas, indicando que a cinética da reação da amostra C foi diferente, comparada às outras amostras. Barras feitas com amostra C apresentaram expansões em torno de 0,27% após 30 dias, enquanto barras feitas com amostras A e B apresentaram expansões médias de 0,18 e 0,10%, respectivamente. Já as imagens de MEV e análise química semi-quantitativa por EDS revelaram a formação de produtos RAA nos poros de um fragmento de barra produzido com amostra C, com morfologia e composição (em termos de Si, Na, K e Ca) conforme Figura 8. As imagens do interior das barras de argamassa produzidas com as amostras A e B mostraram principalmente poros que estavam vazios, ou que foram preenchidos com produtos da hidratação do cimento, como cristais hexagonais de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (NETO *et al.*, 2014).

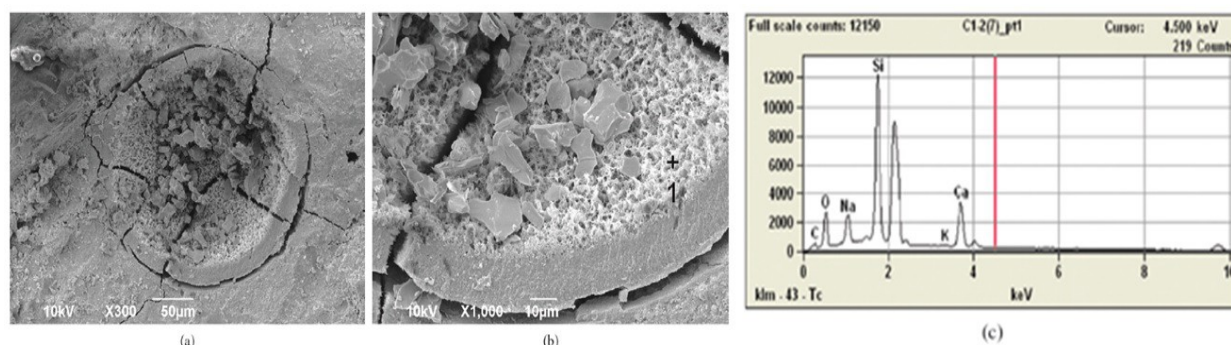


Figura 8. Imagem MEV de: (a) um poro preenchido com produtos RAA em um fragmento de uma barra feita com a amostra C, (b) um detalhe dos produtos RAA, e (c) análise EDS dos produtos RAA. Fonte: NETO *et al.*, (2014).

Nas medidas de expansão da argamassa os resultados foram condizentes com as análises de sílica dissolvida e indicaram a maior propensão da amostra C em desenvolver o RAA. No caso das outras amostras, a dissolução da amostra B foi ligeiramente maior que a da amostra A nas primeiras 96 horas, embora esta tenha sido revertida após 192 horas de tratamento. As análises MEV/EDS revelaram que o interior das barras contendo a amostra C continha poros fissurados preenchidos com produtos da reação, reforçando ainda mais a hipótese de que a expansão nessas barras estava relacionada com o RAA. Já as análises de DRX e EDX mostraram que as diferenças no comportamento de expansão e dissolução da sílica não poderiam ser atribuídas às características químicas e mineralógicas dos agregados. No entanto, as análises petrográficas indicaram que as diferenças poderiam ser explicadas pelas diferentes propriedades texturas (NETO *et al.*, 2014).

Tiecher *et al.* (2017), estudaram a relação entre o grau da deformação de quartzo em agregados para o desenvolvimento da RAS no concreto e sua relação com a dissolução de sílica. A pesquisa compara essas características com o comportamento de campo dessas rochas no concreto e propõe parâmetros para classificar os diferentes graus de deformação do quartzo. Foram selecionadas para esta pesquisa uma rocha quartzítica (rocha metamórfica) contendo 85% de quartzo. Essa rocha foi usada como agregado graúdo no concreto da usina hidrelétrica de Furnas (localizada no Rio Grande-Minas Gerais), que foi afetada pela RAS em 1976, 13 anos após a construção da usina. Também foi avaliado um milonito (rocha de metamorfismo dinâmico) da região metropolitana do Recife. Além disso, três rochas de Monte Bonito (Pelotas-RS), foram selecionadas; estas rochas contêm grãos de quartzo com diferentes graus de deformação: granito, protomililita e ortomilonita. Essas três rochas foram coletadas a partir do mesmo afloramento, a fim de comparar apenas a relação reatividade / textura dos grãos de quartzo contendo diferentes intensidades de deformação, sem considerar a influência de outras características, como sua composição química. Foi usada a inspeção visual para a seleção.

Para esta pesquisa foram realizadas análises petrográficas e análises modais quantitativas com o objetivo de caracterizar e quantificar os minerais constituintes das rochas, com ênfase na textura do mineral quartzo. A MET foi utilizada para caracterizar o grau de deformação dos grãos de quartzo. O teste padrão da barra de argamassa acelerada especificado na norma ASTM C 1260, foi utilizado para quantificar a reatividade alcalina das amostras. O método químico foi realizado de acordo com a norma ASTM C 289. Para determinar o potencial de dissolução da sílica a partir do quartzo, devido ao seu grau de deformação, foi realizado o método do UV segundo a NBR 9848 (TIECHER *et al.*, 2017).

Os autores verificaram na pesquisa que com relação aos grãos de quartzo em que se observou a formação de sub-grãos, eles representam um comportamento interfacial entre os grãos com bandas e os grãos recrystalizados, podendo contribuir significativamente para o aumento das expansões, principalmente nas rochas consideradas menos deformado. Mesmo em um grão levemente deformado, existem caminhos internos propensos à reação com as soluções de poros de concreto alcalino e ao desenvolvimento de RAS. A dissolução da sílica das amostras foi claramente identificada pelo método do espectrofotômetro visível, esclarecendo que esta técnica pode ser utilizada com sucesso para este tipo de avaliação. Também foi possível verificar que os grãos de quartzo com bandas de deformação também são mais solúveis. O quartzo predominante de rochas reativas no campo também possui essa característica, o que confirma o grande potencial deste ensaio para estudos da dissolução da sílica e sua relação com o desenvolvimento da RAS (TIECHER *et al.*, 2017).

A técnica de MET mostrou a presença de paredes mesmo em quartzo levemente deformado, o que indica a presença dos caminhos internos disponíveis para reagir com as soluções alcalinas de poros de concreto e apontam para o potencial desenvolvimento de uma RAS (Figura 9). A presença das bandas de deformação nos grãos de quartzo faz com que a reação de agregados alcalinos ocorra mais rapidamente.

O teste do espectrofotômetro visível foi realizado para avaliar o potencial de dissolução das diferentes amostras de quartzo deformado, o que confirmou que a reatividade do quartzo aumenta à medida que a deformação da estrutura cristalina aumenta. Os parâmetros estabelecidos no presente estudo puderam ser verificados por meio da análise do comportamento de agregados reativos e inócuos dos edifícios (TIECHER *et al.*, 2017).

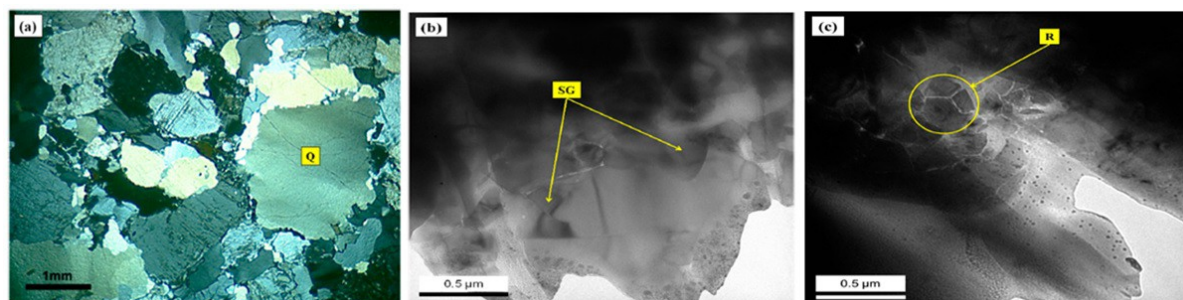


Figura 9. Fotomicrografias de seção delgada do quartzo grau-1 (Q) sob polarização cruzada transmitida microscopia de luz: (a) Microscopia eletrônica de transmissão (MET), (b) e (c) destacando a formação de subgrãos (SG) e grãos recristalizados (R) do quartzo. Fonte: TIECHER *et al.*, (2017).

Um estudo realizado por Tiecher *et al.* (2018), foi estudada a influência das estruturas de deformação de quartzo na ocorrência da RAS, foram selecionadas para este estudo três rochas de Monte Bonito (Pelotas-RS) sendo um granito, um protomylonita e um milonito. Para caracterizar a estrutura e quantificar os grãos de quartzo contidos nestas rochas, foi utilizado a técnica de microscopia ótica. As amostras de quartzo extraídas das rochas foram analisadas por RMN, para avaliar seu potencial de dissolução de sílica, bem como alterações em sua escala atômica, antes e após a reação com hidróxidos alcalinos. Além disso essas análises foram comparadas com os resultados do teste de barra de argamassa acelerada.

As amostras de rochas foram caracterizadas usando análises químicas e petrográficas. A análise química da rocha foi realizada em um espectrômetro de FRX e análise petrográfica por microscopia óptica foi realizada juntamente com a análise modal quantitativa para quantificar cada microestrutura de quartzo diferente, o que reflete os diferentes graus de deformação do quartzo. Foi utilizado o teste de barras de argamassa acelerada, recomendado pela norma ASTM C 1260 para avaliar o desenvolvimento de RAS nas amostras. O teste segundo a NBR 9848 foi realizado para avaliar a dissolução de sílica do quartzo, este ensaio consiste na determinação da coloração resultante de um complexo silico-molibdico com um pH próximo de 1 por espectrofotometria visível. As técnicas de MEV combinada com EDS, foram empregadas para avaliar a mudança na composição dos cristais de quartzo após o ataque alcalino (TIECHER *et al.*, 2018).

Para explicar melhor a relação entre as características do quartzo para o desenvolvimento da RAS, quatro estágios de deformação foram estabelecidos por meio de análise petrográfica. A análise foi realizada para avaliar a dissolução da sílica das diferentes texturas de quartzo realizadas nos grãos extraídos das rochas. Isto mostrou que a presença de paredes de deslocamento no quartzo (Estágio 2) facilita a reação com os hidróxidos alcalinos. O mesmo comportamento foi observado quando a avaliação foi feita pelo teste de barra de argamassa acelerada em que a rocha utilizada não possuía o quartzo extraído. Na Figura 10 é possível observar as micrografias obtidas por microscopia óptica mostrando dissolução de quartzo em argamassas submetidas ao teste de barra de argamassa acelerada (TIECHER *et al.*, 2018).

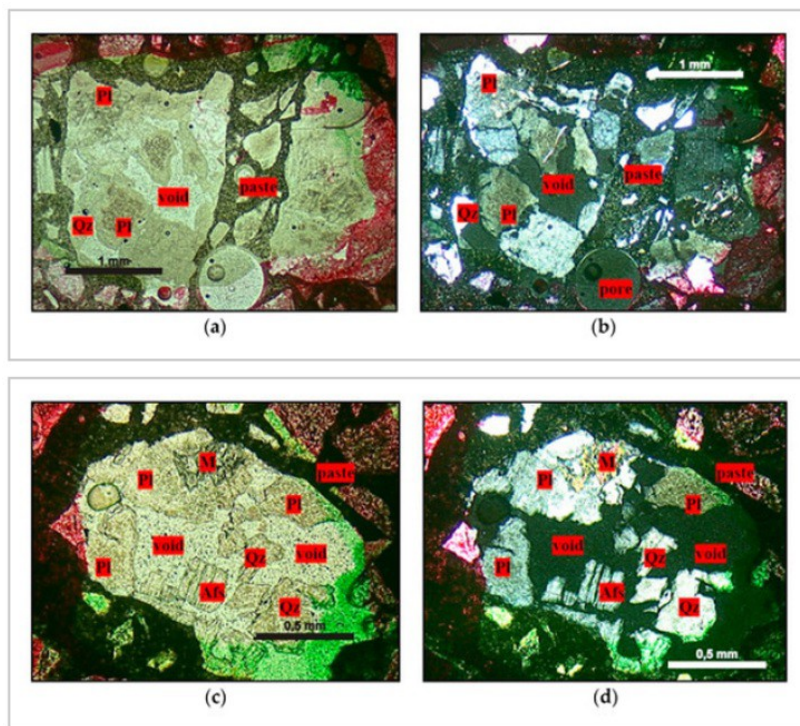


Figura 10. Micrografias: (a) e (b) Luz natural e polarizador cruzado, ampliação de 2,5x; (c) e (d) polarizador cruzado, aumento de 5x. (Qz = quartzo, Pl = plioclásio, Afs = K-feldspato e M = mica).
Fonte: TIECHER *et al.*, (2018).

Os autores concluíram após o estudo, que o quartzo com intensa faixa ondulatória de extinção e deformação denota a condição mais favorável ao desenvolvimento da RAS. No entanto, em escala atômica, os grãos levemente deformados eram altamente propensos a reagir. Assim, em uma condição de alta alcalinidade, durante um longo período de tempo, qualquer quartzo tende a desenvolver a RAS, independentemente do grau de deformação do grão (TIECHER *et al.*, 2018).

Em outro trabalho realizado por Tiecher *et al.* (2018), em Porto Alegre-RS, avaliaram a composição química, a quantidade e a influência da cristalinidade do quartzo que foi analisada através da mesóstase, material intersticial que constitui as rochas vulcânicas, que é um material composto por grãos sub-microscópicos de quartzo e feldspatos. Foram utilizados dois tipos de rochas vulcânicas neste estudo, o basalto (rocha básica) e um riolito (rocha ácida).

A metodologia usada para caracterizar e quantificar as fases minerais das rochas estudadas, foi análise petrográfica juntamente com análise modal (contagem de pontos por área) e DRX. Já para analisar com maior profundidade as diferentes características da mesóstase foi empregada a técnica de MEV juntamente com EDS, conforme Figura 11. Para análise química das rochas foi utilizado a FRX. E por fim para quantificar o potencial reativo alcalino de cada rocha foi realizado o teste de barra de argamassa acelerada (TIECHER *et al.*, 2018).

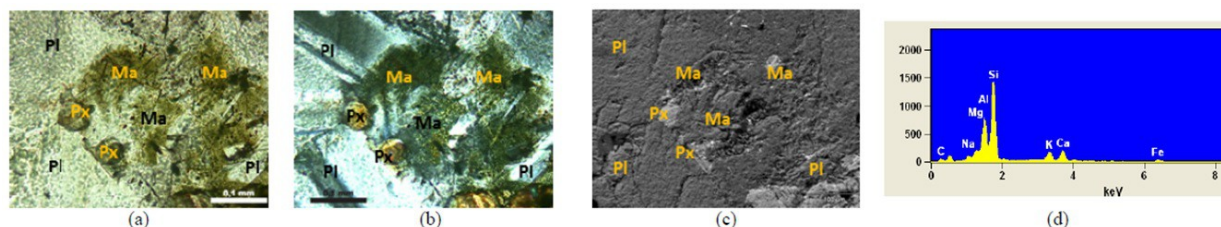


Figura 11. Mesóstase com minerais de argila do basalto: (a) e (b) micrografias obtidas por microscopia de luz sob luz natural e polarizador cruzado, aumento 20x, (c) micrografia obtida por MEV, 250x e (d) análise por EDS. (Pl = plagioclásio, Px = piroxênio, Ma = mesóstase com minerais de argila) Fonte: TIECHER *et al.* (2018).

Os resultados obtidos através do ensaio de expansão, é que a presença de mesóstase microcristalina entre os grãos da rocha, bem como mesóstase com minerais de argila aumenta seu potencial de expansão devido a RAA. Por fim os autores concluíram que a constituição da mesóstase e sua distribuição na rocha são as principais características que potencializam a reatividade de uma rocha vulcânica (TIECHER *et al.*, 2018).

Helene *et al.* (2016) e Fonseca *et al.* (2018), realizaram estudos na ponte Paulo Guerra em Recife que foi construída em 1977. Helene *et al.* (2016), realizaram teste de inspeção específicas, que incluíam a observação visual dos blocos de fundação, extração de núcleos, testes ultrassônicos de velocidade de pulso, teste de carbonatação, medições da concentração de cloretos, resistividade eletroquímica, potencial de corrosão, resistência à compressão e módulo de elasticidade, avaliações de raios X e microscopia. A Figura 12 apresenta uma sequência de fotomicroscopia mostrando evidências de RAA.

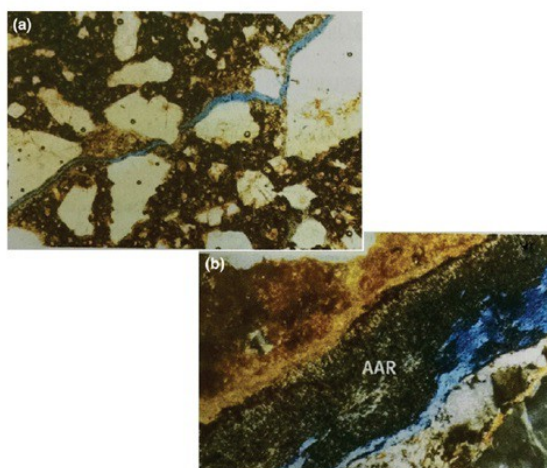


Figura 12. Fissuras e morfologias típicas de RAA. Fonte: HELENE *et al.* (2016).

Os autores Helene *et al.* (2016) e Fonseca *et al.* (2018), concluíram que a ocorrência da RAA nos blocos de fundações da ponte compromete seu desempenho e durabilidade. Mesmo que soluções corretivas sejam feitas, não tem como recuperar totalmente a estrutura. Logo para se evitar a ocorrência da RAA é necessário verificar o potencial reativos dos agregados a serem usados na estrutura (HELENE *et al.*, 2016; FONSECA *et al.*, 2018).

MÉTODOS PARA MITIGAR A RAA

Slaweta (2017), estudou um método para mitigar os danos internos causados no concreto devido à RAS, foi analisado a eficácia da substituição parcial do cimento por halloysite calcinado (meta-halloysite) na melhoria da RAS. A reatividade pozolânica do meta-halloysite também foi avaliada usando TGA. Microestruturas de barras de argamassa foram observadas por MEV acoplada ao EDS para investigar a localização e a composição química do gel da RAS.

Os íons silicatos da dissolução do meta-halloysite reagem com o cálcio e formam a fase C-S-H de uma baixa relação Ca / Si. A fase C-S-H na amostra de meta-halloysite foi capaz de ligar mais sódio em comparação com a C-S-H da amostra de controle, o que sugere que esse mineral pode efetivamente mitigar a RAS. A adição de meta-halloysite às argamassas de cimento resultou em uma expansão reduzida causada pelo RAS. A expansão das amostras após 14 dias diminuiu 12,3% nas argamassas preparadas com adição de 5% de meta-halloysite e 95,9% naquelas com 20% por substituição em massa de cimento por meta-halloysite. A Figura 13 apresenta imagens MEV de argamassa com adição de 20% de meta-halloysite (SLAWETA, 2017).

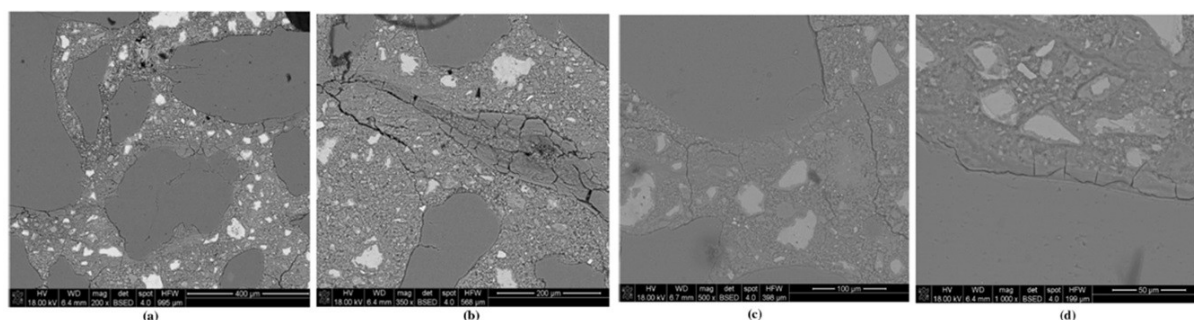


Figura 13. Imagens MEV: (a) gel RAS formado em torno de grãos de agregado de opala (b) gel maciço na matriz de cimento (c) e (d) zona de transição interfacial de agregado de opala e pasta de cimento. Fonte: SLAWETA, (2017).

Comparado com as argamassas de controle, a quantidade de produtos RAS nas argamassas preparadas com meta-halloysite foi menor. Os íons de alumínio provavelmente reduziram a solubilidade da sílica. Nos dois casos, porém, os produtos eram característicos do RAS. No entanto, verificou-se que os géis de silicato de cálcio-sódio-potássio observados em torno de grãos agregados nas argamassas com meta-halloysite a 20% apresentaram uma relação Al/Ca aumentada. Provavelmente o alumínio interagiu com a sílica produzindo aluminossilicato na superfície do agregado reativo, contribuindo assim para a inibição da RAS. Foi observada uma ligeira diminuição no $(Na + K)/Si$ no gel RAS de argamassas com meta-halloysite, em comparação com a amostra de controle (SLAWETA, 2017).

Yazici *et al.* (2019), compararam o potencial de mitigação da RAS usando dois aditivos diferentes materiais cimentícios suplementares (SCMs) e sais de lítio, usando dois métodos, o teste acelerado de barra de argamassa (AMBT) e o teste RILEM AAR-4. Dois tipos de agregado reativo da península anatoliana foram utilizados neste estudo: o primeiro foi a areia natural reativa, obtida de os rios Gediz e Nif, localizados em Ahmetli, a oeste de Izmir na Turquia.

Em 1995, muitas rachaduras semelhantes a mapas foram encontradas em várias novas pontes rodoviárias construídas em Izmir entre Década de 1980 e meados da década de 1990. Em 1996, o Japão internacional agência de cooperação informou que a sílica reativa em cascalho de areia obtidos dos rios Gediz e Nif levaram a RAS nessas pontes. O segundo agregado foi um basalto andesítico (triturado) obtido a partir de Aliaga região localizada aproximadamente à 100 km ao norte de Izmir, na Turquia.

Foram realizadas 96 misturas diferentes com 2 tipos de agregados reativos e 24 combinações diferentes. Os produtos da RAS foram identificados por análise EDS. As Figuras 14 e 15 apresentam as imagens MEV de produtos de RAS observados nas misturas de argamassa de controle contendo agregado A e agregado B respectivamente (YAZICI *et al.*, 2019).

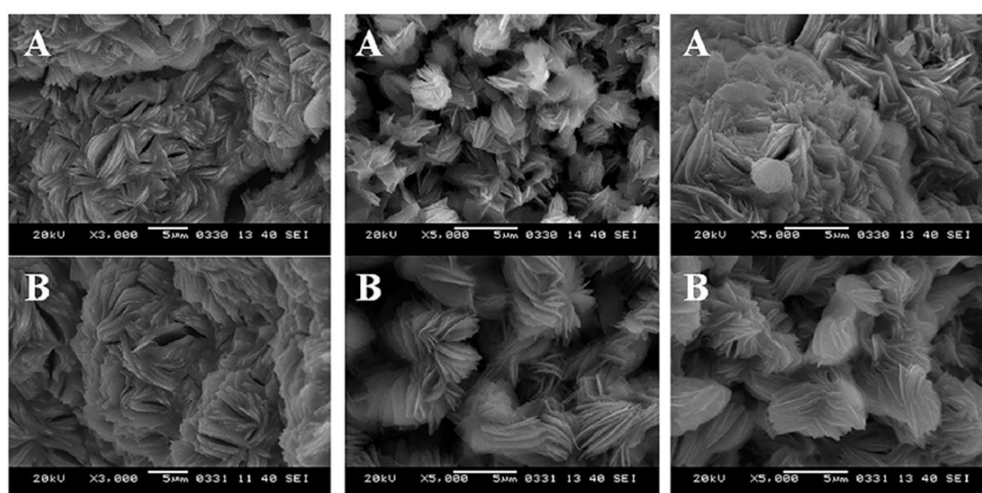


Figura 14. Argamassa de controle contendo agregado A: (A) Amostras curadas com umidade (B) Amostras curadas com vapor. Fonte: YAZICI *et al.*, (2019).

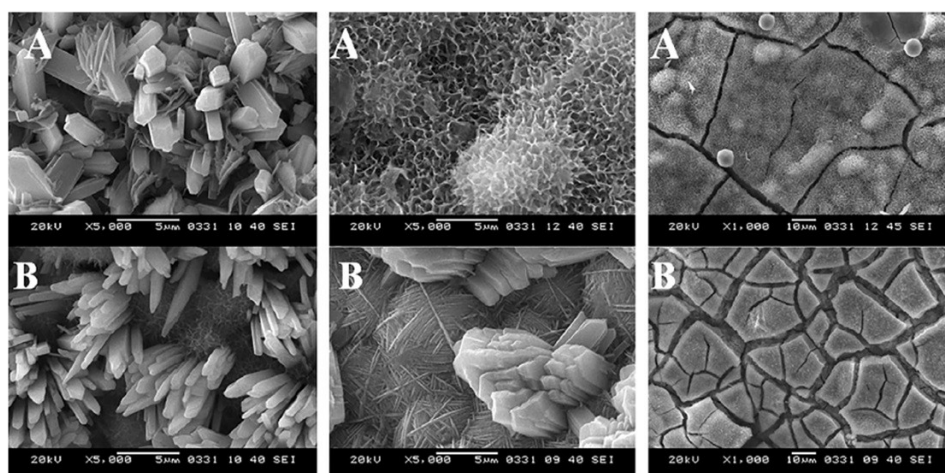


Figura 15. Argamassa de controle contendo agregado B: (A) Amostras curadas com umidade (B) Amostras curadas com vapor. Fonte: YAZICI *et al.*, (2019).

O lítio pode reduzir a taxa de dissolução de sílica, provavelmente devido a uma barreira física na superfície de sílica reativa facilitada pelos íons Li^+ . O potencial de mitigação da RAS dos SCMs pode ser diferente no método RILEM AAR-4 em comparação com o AMBT. Pode ser explicado pelo fato de haver diferenças significativas entre os mecanismos de mitigação da RAS dos SCMs testados em os métodos de teste AMBT e AAR-4. Além disso, depende das taxas de substituição SCM, bem como a expansão deletéria potencial da combinação cimento/agregado (YAZICI *et al.*, 2019).

Slaweta e Swit (2019), estudaram em Kielce na Polônia, o monitoramento do impacto do nitrato de lítio na reação de agregados alcalinos usando métodos de emissão acústica. O nitrato de lítio é uma mistura química usada para reduzir os efeitos da corrosão. Os autores compararam a atividade acústica das argamassas de referência com as argamassas contendo nitrato de lítio.

Argamassas com nitrato de lítio demonstram pequena atividade acústica, o que confirma a efetividade da mistura como inibidor de corrosão. Os processos de corrosão ocorrem, mas em uma extensão muito menor do que nas argamassas de referência. Os sinais gravados tinham pouca força e amplitude ainda menor, indicando menos danos materiais. A redução de trincas nas argamassas com nitrato de lítio foi confirmada pelos parâmetros dos sinais registrados, ou seja, energia e duração do sinal (SLAWETA & SWIT, 2019).

A atividade acústica das argamassas com nitrato de lítio é confirmada por observações de microestrutura. O agregado reativo é dissolvido e os produtos da reação de crescimento são formados em seu lugar, causando rachaduras e descolamento agregado da matriz de cimento. Nenhuma camada protetora de produto foi encontrada na interface entre agregado e pasta de cimento. Durante todo o período analisado, o agregado de opala foi sujeito a processos de danos, mas na amostra com nitrato de lítio apenas uma quantidade menor de gel alcalino da RAS foi detectada. Os resultados dos testes da atividade acústica de argamassas com nitrato de lítio estão bem correlacionados com os resultados obtidos pelo MEV. Conforme Figura 16 as imagens da microestrutura confirmaram a formação de um gel expansivo de sílica e álcalis, causando rachaduras no agregado e nas zonas de interface entre os agregados reativos e a pasta (SLAWETA & SWIT, 2019).

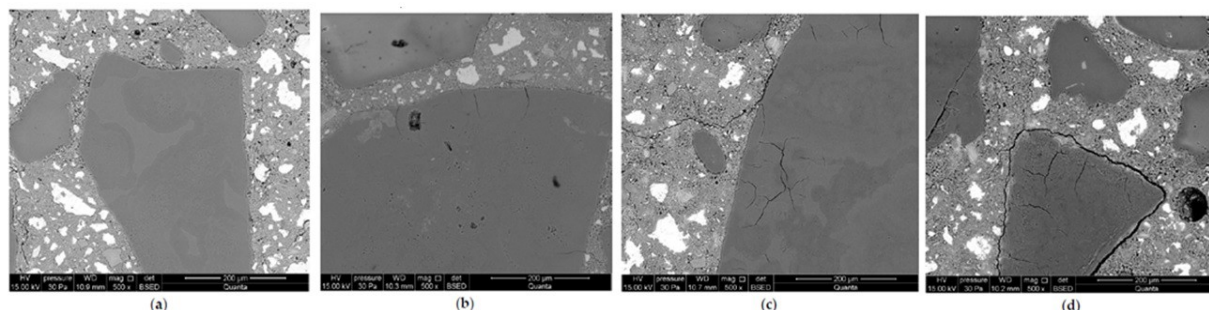


Figura 16. Microestrutura de argamassas com nitrato de lítio, analisada junto com o progresso da reação após: (a) 1 dia; (b) 3 dias; (c) 7 dias; e (d) 14 dias. Fonte: SLAWETA & SWIT, (2019).

Um estudo realizado por Abbas *et al.* (2019), examinou o uso da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SBA) para mitigação da RAS em concretos incorporando agregados reativos. Os autores analisaram as características físicas e químicas dos materiais usados, por meio do FRX e DRX, a gravidade de acordo com a ASTM D188 e finura específica pela ASTM C184, análise petrográfica de agregados foi realizada de acordo com ASTM C295 e teste químico usando ASTM C289. Para avaliar a atividade pozzolânica da SBA e seus efeitos nas propriedades frescas e endurecidas do concreto, foram usados o TGA e DTA. O potencial da SBA em diminuir a expansão da RAS em estruturas de concreto foi investigada através do ASTM 1260, foram realizadas quatro dosagens com teores de SBA diferentes. O comportamento microestrutural e química composição dos espécimes que incorporam SBA foram observados através do MEV associado ao EDS. Os agregados foram coletados em uma pedreira na cidade de Sargodha no Paquistão.

Os autores verificaram com a adição de SBA que houve uma redução na expansão da RAS, devido à capacidade de ligação alcalina do SBA, o que diminui a disponibilidade de álcalis para reagir com agregados e, portanto, limita a RAS. Nenhuma rachadura ou deterioração da superfície foi observado para amostras que incorporam SBA; porém, amostras de controle sem SBA mostraram superfície relativamente deterioração junto com algumas rachaduras menores na superfície. Portanto, a adição de SBA pode ser uma opção viável para controlar RAS e os danos associados (ABBAS *et al.*, 2019).

Foi verificado que o tempo de endurecimento das misturas que incorporam SBA aumentou em comparação com a mistura controle sem SBA. Observou-se que a resistência à compressão de mistura incorporando 10% de SBA foi comparável à amostra de controle devido à reação pozzolânica. A análise do MEV revelou que as amostras com incorporação de SBA não mostrou sinais de rachaduras (Figura 17). A Figura 18 apresenta os resultados de expansão para misturas que incorporam SBA (ABBAS *et al.*, 2019).

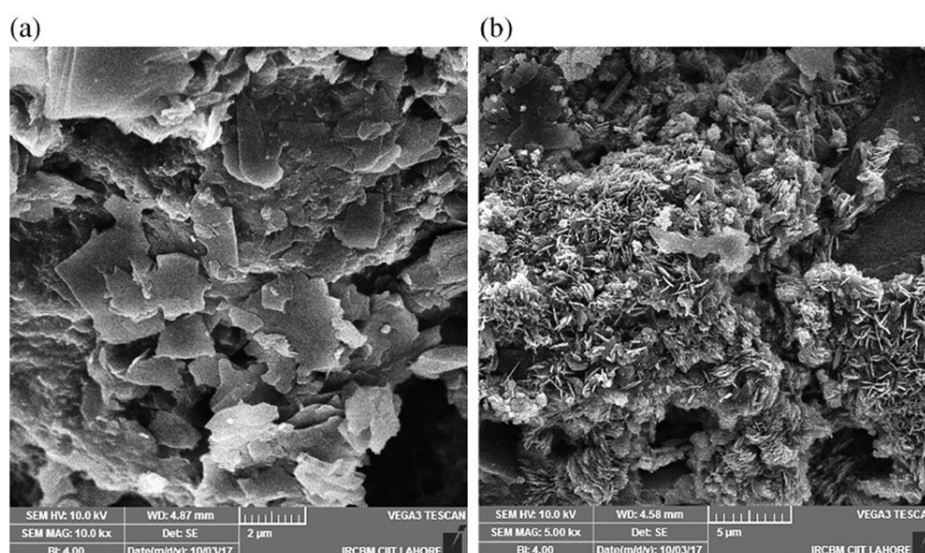


Figura 17. Imagens MEV: (a) amostra de controle sem SBA (b) amostra com 20% de SBA. SBA, cinza do bagaço da cana-de-açúcar; SEM. Fonte: ABBAS *et al.*, (2019).

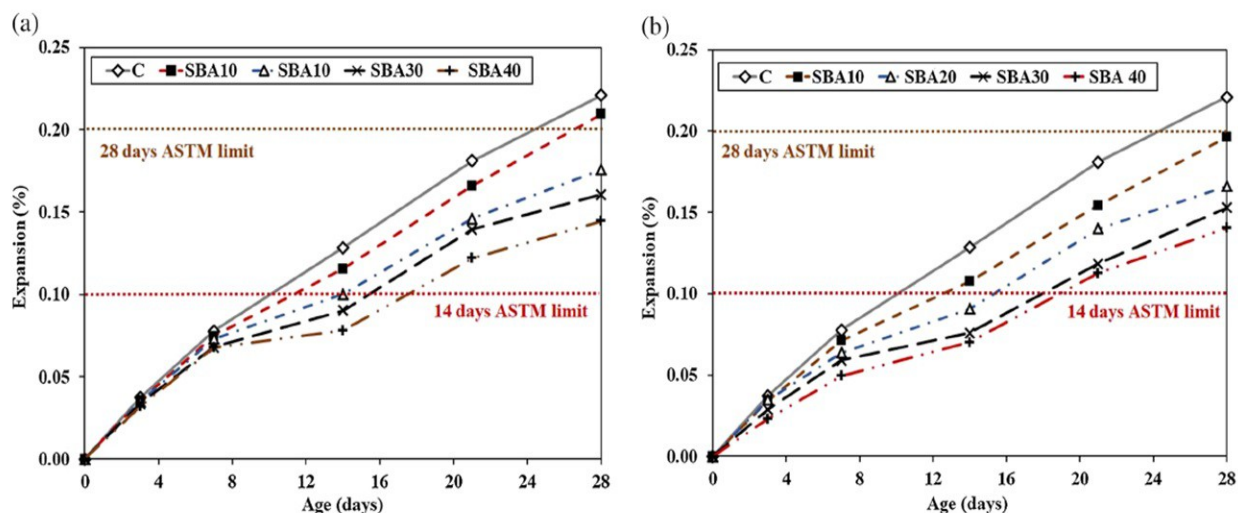


Figura 18. Teste de Expansão: (a) misturas que incorporam fluxo constante (b) misturas que incorporam relação a / c constante. SBA, cinza de bagaço de cana. Fonte: ABBAS *et al.*, (2019).

A análise EDS mostrou que a amostra que incorpora SBA exibiu menor CaO/SiO_2 . Isso foi atribuído principalmente ao efeito de diluição e álcalis. capacidade de absorção da SBA, levando a mitigar a expansão da RAS e rachaduras. Portanto, os autores concluíram que o uso da SBA é eficaz na mitigação do RAS devido à ação pozolânica, comportamento do SBA levando a ligar os álcalis e inibir a expansão e rachaduras associadas (ABBAS *et al.*, 2019).

CONCLUSÕES

A RAA é considerada um problema para a construção civil, devido as patologias causadas no concreto, ocorrendo assim perda de resistência mecânica e durabilidade. Pois essa reação química que ocorre entre os álcalis presentes no cimento Portland e agregados reativos com a presença constante de umidade, é um dos aspectos que tornam as pesquisas que analisam e identificam os agregados de extrema relevância, pois suas características mudam dependendo da região e do local que são extraídas.

Os resultados das pesquisas apontam para a importância de conhecer os agregados e o comportamento da RAA, estudos são realizados no mundo inteiro com intuito de identificar a reatividade dos agregados. Outro ponto importante nas pesquisas foram os estudos realizados para mitigar os efeitos da RAA que também se mostraram de suma relevância e mostraram ser viáveis.

Todos os ensaios, testes e técnicas usadas pelos autores apontam para um resultado satisfatório para as pesquisas, e mostram o grande valor desses estudos para se evitar a ocorrência da RAA em estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S; SHARIF, A; AHMED, A; ABBASS, W; SHAUKAT, S. Prospective of sugarcane bagasse ash for controlling the alkalisilica reaction in concrete incorporating reactive aggregates. **Structural Concrete, Journal of the fib**, 21(2),781-793, 2019.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15577**: Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 20, 2018.
- BATTAGIN, A; SILVEIRA, AL; MUNHOZ, F; BATTAGIN, I. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional. In: **Concreto e construções**, 44. Ibracon, 2016.
- BEAUCHEMIN, S; FOURIER, B; DUCHESNE, J. Evaluation of the concrete prisms test method for assessing the potential alkali-aggregate reactivity of recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, 104, 25-36, 2018.
- FONSECA, JMM; SOUZA, VKB; SILVA, DGC. Alkali-Aggregate Reaction: Definition, Influence and Control. **Engineering and Applied Sciences** 3, 12-20, 2018.
- FUSCO, PB. Tecnologia do concreto estrutural: Tópicos aplicados. 1ªed., São Paulo, **PINI**, 2008.
- HASPARYK, NP. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2, 933-1001, 2011.
- HELENE, P. Manutenção para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto. 2ªed. **Pini**, São Paulo, 1992.
- HELENE, P; CRAVALHO, M; PACHECO, J. Engineering field tests for alkali-aggregate reaction. **Structural Concrete**, 18, 349-355, 2016.
- JÓZWIAK-NIEDZWIEDZKA, D; ANTOLIK, A; DZIEDZIC, K; GLINICKI, M; GIBAS, K. Resistance of selected aggregates from igneous rocks to alkali-silica reaction: verification. **Road and Bridge Research Institute** 18(1), 67-83, 2019.
- LEEMANN, A. Raman microscopy of alkali-silica reaction (ASR) products formed in concret. **Cement and Concrete Research**, 102, 41-47, 2017.
- LEEMANN, A; MUNCH, B. The addition of caesium to concrete with alkali-silica reaction: Implications on product identification and recognition of the reaction sequence. **Cement and Concrete Research** 120, 27-35, 2019.
- MEHTA, PK; MONTEIRO, PJM. Evolução em tecnologia do concreto. Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais, 3 ed., São Paulo, **Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON)**, 2008.
- MUNIR, MJ; ABBAS, S; QAZI, AU. Role of test method in detection of alkali-silica reactivity of concrete Aggregates. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials** 174, 203-221, 2018.
- MURLIDHAR, BR; MOHAMAD, ET; ARMAGHANI, DJ. Potential alkali silica reactivity of various rock types in na aggregate granite quarry. **Measurement** 81, 221-231, 2016.
- NETO, DPG; CONCEIÇÃO, H; LISBOA, VAC; SANTANA, RS. BARRETO, LS. Influence of Granitic Aggregates from Northeast Brazil on the Alkali-aggregate Reaction. **Materials Research**, 17, 51-58, 2014.
- NEVILLE, AM. Propriedades do concreto. 5ª ed. Porto Alegre: **Bookman**, 2016.
- OTOCH, S. Reação álcali-agregado: o que é e como evitar?. Ano 44. Ed. **Ibracon**, 2016.
- PRISZKULNIK, S. Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado. In: ISAIA, G.C. (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: **Ibracon**, 2. Cap. 34, 1017-1070, 2005.
- RAJABIPOUR, F; GIANNINI, E; DUNANT, C; IDEKER, JH; THOMAS, MDA. Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research** 76, 130-146, 2015.
- RAMOS, V; FERNANDES, I; SILVA, AS; SOARES, D. Potential reactivity of granitic rocks. Petrographic characterization vs accelerated expansion tests. **IBRACON structures and materials jornal** 9(1), 66-74, 2016.
- SACHLOVA, S; KUCHAROVÁ, A; PERTOLD, Z; PRIKRYL, R; FRIDRICHOVÁ, M. Quantitative assessment of alkali silica reaction potential of quartz-rich aggregates: comparison of chemical test and accelerated mortar bar test improved by SEM-PIA. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 74, 133-144, 2017.
- SLAWETA, JZ. The effect of meta-halloysite on alkali-aggregate reaction in concret. **Materials and Structures** 50 (217), 1-12, 2017.
- SLAWETA, JZ; SWIT, G. Monitoring of the Impact of Lithium Nitrate on the Alkali-aggregate Reaction Using Acoustic Emission Methods. **Materials** 12(1), 1-13, 2019.
- TAYLOR, HFW. Cement Chemistry. 2 ed. London: **Thomas Telford**, 1997.
- THOMAS, M. et al. "Alkali-aggregate reactivity (AAR)" facts book. **Federal Highway Administration**. United States, 2013.
- TIECHER, F; GOMES, MEB; MOLIN, DCC; HASPARYK, NP; MONTEIRO, PJM. Relationship between Degree of Deformation in Quartz and Silica Dissolution for the Development of Alkali-Silica Reaction in Concrete. **Materials**, 10(9), 1-17, 2017.

TIECHER, F; FLORINDO, RN; VIEIRA, GL; GOMES, MEB. MOLIN, DCC; LERMEN, RT. Influence of the Quartz Deformation Structures for the Occurrence of the Alkali–Silica Reaction. **Materials**, 11, 1-21, 2018.

TIECHER, F; GOMES, MEB; MOLIN, DC. Alkali-Aggregate Reaction: A study of the influence of the petrographic characteristics of volcanic rocks. **Engineering, Technology & Applied Science Research** 8(1), 2399-2404, 2018.

YAZICI, H; BEGLARIGALE, A; FELEKOGLU, KT; TURKEL, S. Comparing the alkali-silica reaction mitigation potential of admixtures by using different accelerated test methods. **Construction and Building Materials** 197, 597-614, 2019.