



FUNDAÇÃO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS – FUPAC
FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE UBÁ
ENGENHARIA CIVIL

ANNELISE RIBEIRO

ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

UBÁ/MG
2021

ANNELISE RIBEIRO

ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade Presidente Antônio Carlos de Ubá - FUPAC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. .

Orientadora: Dr^a. Érika Maria Carvalho Silva Gravina

**UBÁ/MG
2021**

RESUMO

Considerado como o material de maior utilização nas obras, o concreto vem sendo alvo de cuidados e estudos acerca de sua durabilidade frente à ação de manifestações patológicas. Uma das formas de deterioração desse material é a presença da reação álcali-agregado (RAA) em seu meio, visto que essa é responsável pela formação de um gel higroscópico expansivo prejudicial ao concreto. A reação álcali-agregado é um processo químico deletério que envolve a água, os hidróxidos alcalinos presentes no cimento e alguns componentes mineralógicos reativos encontrados em agregados. Com o presente trabalho, objetivou-se descrever as causas e consequências da reação álcali-agregado em estruturas de concreto e sua interferência na vida útil, além de apresentar os recursos de mitigação e prevenção da RAA e as principais formas de proteção e reforço de estruturas afetadas pela reação. Os principais fatores que influenciam a reação são a quantidade de álcalis, a reatividade dos agregados, umidade, temperatura e porosidade do concreto. A Associação Brasileira de Normas Técnicas estabeleceu sete normas para auxiliar na investigação e mitigação da RAA. A reação afeta a durabilidade de uma estrutura de concreto, uma vez que acarreta em patologias irreversíveis como a fissuração, deformações estruturais, perda de resistência mecânica e homogeneidade. Em se tratando desse fenômeno, não há soluções completamente eficientes para recuperar uma estrutura, portanto, o melhor caminho é a prevenção e mitigação, com o auxílio de adições minerais, cimentos especiais ou troca do agregado, quando possível.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Concreto. Durabilidade.

ABSTRACT

Considered as the most widely used material in buildings, concrete has been the target of care and studies regarding its durability against the pathological manifestations action. One of the forms of this material deterioration is the alkali-aggregate reaction (AAR) presence in its environment, since this is responsible for the formation of an expansive hygroscopic gel that is harmful to concrete. The alkali-aggregate reaction is a deleterious chemical process that involves water, alkali hydroxides present in cement and some reactive mineralogical components found in aggregates. This final paper aimed to describe the causes and consequences of the alkali-aggregate reaction in concrete structures and its interference in their useful life, in addition to presenting the mitigation and prevention resources of AAR and the protection and reinforcement main forms of structures affected by the reaction. The main factors that influences the reaction are the amount of alkali, the reactivity of the aggregates, moisture, temperature and the concrete porosity. The Brazilian Technical Standards Association has established seven standards to assist in the AAR investigation and mitigation. The reaction affects the concrete structure durability, as it leads to irreversible pathologies such as cracking, structural deformations, loss of mechanical strength and homogeneity. In terms of this phenomenon, there are no completely efficient solutions to recover a structure, therefore, the best path is prevention and mitigation, with mineral additions, special cements or aggregate replacement support, when possible.

Keywords: Alkali-aggregate reaction. Concrete. Durability.

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material com maior índice de uso nas obras civis da atualidade, principalmente pela vasta quantidade de matéria-prima disponível para sua preparação, sua fácil trabalhabilidade e custos relativamente baixos quando comparado a outros materiais. Dessa forma, tem-se ampliado os estudos acerca de sua durabilidade, fazendo-se necessário o controle tecnológico dos materiais que o constituem, para que assim seja possível detectar problemas que possam reduzir a vida útil de uma estrutura de concreto, como as manifestações patológicas. Dentre essas patologias, nota-se a presença da reação álcali-agregado que danifica construções de concreto, especialmente, barragens, blocos de fundações e pontes.

O comportamento quimicamente inerte dos agregados foi estudado inicialmente por Stanton, em 1940, através de apurações experimentais, possibilitando observar que nos constituintes do concreto ocorre uma reação química prejudicial ao mesmo, ocasionada pela associação dos componentes minerais de agregados reativos e os álcalis do cimento. A reação descoberta na Califórnia ficou denominada como Reação álcali-agregado (RAA) e seus primeiros registros no Brasil datam de 1985, descrevendo a ação da patologia na Usina Hidrelétrica Apolônio Sales de Oliveira em Moxotó.

Verificada nos poros do concreto, a reação álcali-agregado pode ser definida como um processo químico que envolve íons hidroxilas que em associação aos elementos alcalinos do cimento como sódio e potássio e com alguns compostos mineralógicos reativos oriundos de agregados graúdos e miúdos acarretam problemas nas estruturas de concreto. Essa reação é um fenômeno expansivo que ocorre sob circunstâncias de umidade, podendo originar, ou não, um gel expansivo capaz de gerar fissuração, deslocamentos estruturais, aumento da permeabilidade, redução da resistência e, em alguns casos, o colapso da estrutura.

Uma das patologias mais deletérias para o concreto e de difícil mitigação é a RAA, fato que no meio técnico-científico gera uma preocupação com a vida útil e segurança de uma estrutura. Nos últimos tempos, há um grande número de casos e em escala crescente decorrentes da reação. Entretanto, é difícil associar as características da manifestação à reação álcali-agregado, uma vez que existem ocorrências com particularidades similares, evidenciando a importância de estudos e investigações acerca do tema.

Com este trabalho, objetiva-se descrever as causas e consequências da reação álcali-agregado em estruturas de concreto e sua interferência na vida útil, além de apresentar os

recursos de mitigação e prevenção da RAA e as principais formas de proteção e reforço de estruturas afetadas pela reação.

O estudo da reação álcali-agregado justifica-se para a compreensão das origens, ações, medidas preventivas e corretivas da patologia, uma vez que há um crescente número de construções civis atingidas pela RAA, considerando ainda a difícil identificação da patologia, os custos elevados das medidas de recuperação da estrutura e suas ações deletérias no concreto.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Reação álcali-agregado

2.1.1 Histórico

Segundo Hasparyk (2005), os primeiros estudos experimentais da RAA foram realizados por Stanton, na Califórnia, em 1940, que observou as fissuras e expansões em estruturas de concreto, concluindo que essas foram causadas pela interação entre os componentes do concreto: cimento (hidróxidos alcalinos), agregados reativos (sílica) e água, a qual denominou de reação álcali-agregado. Em acordo, para a sustentação do proposto por Stanton, diversos trabalhos subsequentes foram publicados na década de 40 pelos autores Meissner, Hansen e Berkey. Todavia, na década de 50, o estudo da reação desacelerou, retornando sua investigação mais rígida apenas na década de 70, com o relato de acontecimentos do fenômeno em diversos países (MIZUMOTO, 2009).

No Brasil, a manifestação patológica teve seus primeiros trabalhos de prevenção na década de 60, na construção da barragem de Jupia, cujo material obtido do Rio Paraná foi identificado como reativo. Mas, o primeiro caso da reação em uma estrutura foi identificado em 1985, na Usina Hidrelétrica Apolônio Sales de Oliveira e seguidamente, em 1988, na barragem de Joanes II (NOGUEIRA, 2010).

Ribeiro (2018) afirma que anteriormente a reação álcali-agregado era considerada como uma ação deletéria apenas para obras como barragens e pontes, desconsiderando seu impacto em construções civis. Porém, em 2004, constatou-se a ocorrência da anomalia em blocos de fundação em edifícios na região de Recife/PE, contribuindo para alertar o meio técnico de todo o mundo.

Ainda que esse fenômeno tenha sido descoberto por Stanton há muitos anos, Hasparyk (2005) diz que é notória a dificuldade de compreender e controlar a reação álcali-agregado, uma vez que iniciada, não há uma maneira completamente eficiente para conter a evolução da reação.

2.1.2 Definição e características

De acordo com Hasparyk (2005) e Otoch (2016), a reação álcali-agregado é um processo químico que se verifica internamente no concreto endurecido, a partir da reação dos

minerais reativos dos agregados (brita e areia) com os hidróxidos alcalinos encontrados nos poros do concreto. Dessa forma, quando ocorre a expansão do concreto através de sua ação, a estrutura está sujeita ao surgimento de fissuras, deslocamentos diferenciais, lascamentos, aumento da permeabilidade e redução da resistência química e mecânica. Segundo Lapa (2008, p. 16): “o concreto sob reação álcali- agregado exibe em sua superfície um mapa de fissuras, que permite a entrada de mais umidade, acelerando ainda mais a reação”.

Nas FIG. 1 e FIG. 2 nota-se o quadro típico de fissuração provocada pelas expansões decorrentes da reação álcali-agregado.

Figura 1 – Bloco de fundações com fissuras em forma de mapa



Fonte: Silva (2007, p.46)

Figura 2 – Bloco de fundações do Edifício Apolônio Sales fissurado pela ação RAA



Fonte: Silva (2007, p.29)

A denominação álcali-agregado é um termo genérico utilizado para designar diferentes formas de degradação do concreto, sendo elas a reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato (tipo específico da RAS) e a reação álcali-carbonato (RAC), essa última de ocorrência atípica e sem a formação do gel expansivo (OTOCH, 2016).

A reação álcali-agregado mais comumente encontrada é a RAS, caracterizada por ser um processo químico com rápido desenvolvimento, que ocorre entre a sílica reativa presente nos agregados e os álcalis do cimento (sais de sódio e potássio que em contato com água são solubilizados). Algumas formas que a sílica reativa apresenta são opala (amorfa), calcedônia (criptocristalina fibrosa) e tridimita (cristalina), que se encontram em diversos tipos de rochas (NEVILLE; BROOKS, 2013; RIBEIRO, 2018).

A reação se desenvolve a partir dos ataques dos hidróxidos alcalinos, advindos das hidroxilas e álcalis do cimento, nos materiais silicosos, ocasionando a formação de um gel de silicato alcalino. Este gel higroscópico atrai água por absorção ou osmose, promovendo aumento do seu volume. Nesse sentido, como o gel se forma na pasta de cimento (poros do concreto ou superfícies dos agregados), surgem pressões internas, causadas pela pressão hidráulica devido à expansão do gel, que podem ultrapassar a resistência à tração do concreto, ocasionando sua expansão e consequente fissuração (NEVILLE; BROOKS, 2013).

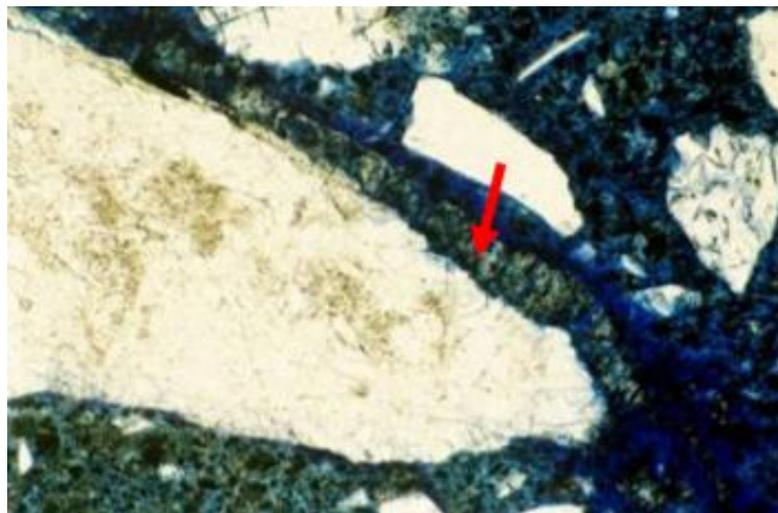
A partir da FIG. 3 é possível observar a exsudação do gel higroscópico na trinca presente na superfície do concreto, enquanto na FIG. 4, apresenta-se a formação do gel em torno da superfície do agregado.

Figura 3- Detalhe de gel exsudando na superfície do concreto



Fonte: Hasparyk (2005, p.109)

Figura 4 – Gel desenvolvendo-se no contorno dos agregados



Fonte: Silva (2007, p.67)

Segundo Battagin (2016), as características típicas de uma patologia decorrente da reação álcali-silica (RAS) englobam fissuras, expansões, desalinhamento de elementos estruturais, *pop-outs*¹ e formação de gel nas fissuras ou no entorno dos agregados no concreto.

De acordo com Taylor (1997 *apud* COUTO, 2008) o tempo para a reação se desencadear é variável, podendo ocorrer em questões de dias ou até mesmo anos. Nesse sentido, o tempo para sua ocorrência dependerá de diversos fatores, entre eles têm-se as concentrações dos álcalis nas soluções dos poros do concreto, as dimensões das partículas do agregado, entre outros que serão abordados mais a frente. Entretanto, é comum que ocorra seu desenvolvimento entre cinco e doze anos (POOLE, 1992 *apud* HASPARYK, 2005; BATTAGIN, 2016).

A reação álcali-silicato é um tipo particular da RAS, que se desenvolve pela interação dos álcalis com alguns silicatos encontrados nos feldspatos, rochas sedimentares, magmáticas e metamórficas. Por ser um processo complexo e pouco investigado, acredita-se que o mecanismo da reação e seus processos sejam similares à reação álcali-silica, diferenciando-se pela velocidade mais lenta em que evolui (RIBEIRO, 2018).

Considerada rara, a reação álcali-carbonato ocorre entre alguns agregados rochosos carbonáticos (dolomíticos argilosos) e os hidróxidos alcalinos contidos nos poros do concreto, que ao reagir podem ocasionar a desdolomitização, ou seja, um processo de decomposição da dolomita que origina a brucita (hidróxido de magnésio). Neste fenômeno, a brucita sofre um aumento de volume devido à absorção de íons hidroxilos pelos minerais de argila, entretanto, não há formação de gel expansivo (HOBBS, 1988 *apud* LUCCA, 2010).

¹ Desprendimento de pequenos fragmentos da superfície do concreto, conhecido também como pipocamento.

Portanto, para que a RAA de fato ocorra, Bravo *et al.* (2020) afirmam que é necessária a presença concomitante de água, hidróxidos alcalinos e agregados reativos. Assim, obras como barragens de concreto, blocos de fundações e pontes são mais propícias a sofrerem ações por esse fenômeno, que pode ser agravado pelas condições ambientais e disponibilidade dos agregados para utilização em determinadas regiões.

2.1.3 Principais condições que influenciam na ocorrência da RAA

2.1.3.1 Álcalis

A norma Brasileira, NBR 15577-1(ABNT, 2018, p.2), define os álcalis como: “sais de sódio e/ou potássio, provenientes de qualquer fonte interna ou externa ao concreto, que quando em contato com água são solubilizáveis imediatamente ou ao longo do tempo”.

De acordo com Nogueira (2010) os álcalis presentes no concreto são provenientes principalmente do cimento. Esse, por sua vez, utiliza em sua fabricação o clínquer em grandes quantidades, um elemento que possui em sua composição álcalis expresso na forma de óxido de sódio e óxido de potássio.

Segundo Otoch (2016), ainda que o cimento seja o principal contribuinte com os álcalis no concreto, outras fontes não podem ser desconsideradas como, por exemplo, a água de amassamento, aditivos, adições minerais e, até mesmo, minerais de alguns agregados.

Hasparyk (2005) alega que quanto mais elevado o consumo de cimento do concreto e o teor de álcalis no cimento, maiores serão as expansões decorrentes da reação. Ribeiro (2018) completa que para a ocorrência da RAA uma concentração de equivalente alcalino² ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$) maior ou igual a 0,6% ou entre os valores de 3 a 5 kg/m^3 é suficiente para favorecer a ocorrência da reação.

2.1.3.2 Agregados reativos

Segundo Couto (2008), uma das maiores dificuldades para enfrentamento da RAA são as características de alguns minerais encontrados nas rochas, que em quantidades e condições específicas podem desencadear a expansão deletéria do concreto. Entretanto, para o autor,

² Produto originado da reação entre óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O) presentes no cimento, representado pela seguinte equação química: $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$.

outro ponto favorável para a reação ocorrer, são as propriedades dos mesmos, relacionadas à forma do grão, dimensão das partículas e teor do agregado reativo.

De acordo com Carasek, Cascudo e Caetano (2016) a fase reativa dos agregados é advinda, principalmente, dos minerais contidos em sua estrutura, como por exemplo, alguns agregados silicosos, compostos por sílica amorfa mal cristalizada (opala ou vidro), microcristalina, criptocristalinas, tridimita, cristobalita, quartzo e feldspatos deformados.

Todavia, Neville e Brooks (2013) completam que ainda que se conheçam vários agregados reativos, é complexo determinar se um agregado específico poderá contribuir na reação de expansão, uma vez que um teor tão pequeno, como 0,5% de reatividade em um agregado considerado seguro, já pode causar danos.

Ribeiro (2018) pontua que a reatividade de um agregado pode ser potencializada proporcionalmente ao índice de desorganização e instabilidade da estrutura do mineral pertencente ao agregado. Além disso, o tamanho dos cristais influencia na fase reativa, visto que quanto menor a superfície dos cristais, maior será a superfície de contato para favorecer a reação.

O método empregado para se obter os dados sobre a reatividade do agregado é chamado Análise Petrográfica, que será abordada nos próximos tópicos.

2.1.3.3 Umidade

Nogueira (2010) analisa que a água é o principal fator de degradação do concreto, por ser um solvente capaz de dissolver elementos químicos em íons e gases e ter a capacidade de se mover nos poros do concreto facilmente, devido às dimensões de suas partículas. Nesse sentido, a presença de água ou umidade é fundamental para o desenvolvimento da reação álcali-agregado. Sem elas a RAA não tem potencial para acontecer, ainda que existam agregados reativos e álcalis no processo.

Otoch (2016) relata que para a reação ocorrer é preciso que a estrutura esteja em contato direto com a água ou a umidade relativa do ar no ambiente esteja acima de 80%. Ribeiro (2018) afirma que a água tem duas aplicabilidades para a reação, sendo a primeira de transportar os íons hidroxilas e cátions alcalinos e a segunda é contribuir na expansão do gel originado ao ser absorvida pelo mesmo.

Uma das formas de reduzir os impactos gerados pela reação seria impedir o contato da água com o concreto, entretanto, ainda não há uma forma econômica e completamente segura de impossibilitar esse contato (NOGUEIRA, 2010).

2.1.3.4 Temperatura

A temperatura é um ponto significativo para se considerar nas reações álcali-agregado, uma vez que essa funciona como um catalisador, possuindo uma ação cinética no processo. Assim, altas temperaturas aceleram as reações químicas, agilizando o início e a velocidade da expansão, seguido dos efeitos danosos à estrutura (CARASEK; CASCUDO; CAETANO, 2016; NOGUEIRA, 2010).

2.1.3.5 Porosidade do concreto

Dependente da relação água/cimento e de seus materiais constituintes, a porosidade do concreto contribui com a RAA da seguinte forma de acordo com os autores Carasek, Cascudo e Caetano (2016): por um lado, concretos com alta porosidade possuem maior espaço interno, fato que auxilia em melhores condições para expansão do gel, todavia, ele favorece o armazenamento de águas intersticiais, sendo a água um fator indispensável para a reação ocorrer. Por outro lado, baixas porosidades em concretos tendem a limitar o espaço para a acomodação do gel expansivo, entretanto, dificulta o transporte dos reagentes até os agregados. Dessa forma, para Rodrigues (2014), a porosidade da massa de concreto endurecido gera caminhos distintos de interpretação, não possibilitando definir qual das influências é mais relevante para a ocorrência da reação.

2.2 Diretrizes normativas acerca da reação

A jurisdição Nacional responsável pela elaboração das Normas Brasileiras é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Uma das diretrizes elaboradas pela associação é a NBR 15577 -“Agregados- Reatividade Álcali-Agregado”, que é subdividida em sete partes, descrevendo desde a avaliação da reatividade dos agregados até ensaios e medidas mitigatórias para a reação, ou seja, contém todas as informações que são relevantes para o estudo da RAA. Entretanto, a reação álcali-carbonato não é tratada nesta norma.

A parte 1, NBR 15577-1(ABNT, 2018): “Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto”, trata das condições para utilizar agregados no concreto, observando as formas de preservá-lo das ações destrutivas que a reação poderá causar. Para tanto, foram abordadas as questões da classificação das consequências que a reação pode ocasionar; seu risco de ocorrência, relacionado ao grau de

reatividade do agregado, às dimensões e exposição da estrutura ao ambiente; os métodos de avaliação de reatividade do agregado e as medidas preventivas e mitigatórias.

A parte 2, NBR 15577-2 (ABNT, 2018): “Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto”, determina os processos para realizar a coleta e redução de amostragens de agregados, além da periodicidade para a realização dos ensaios dos mesmos para serem utilizados no concreto.

A parte 3 NBR 15577-3 (ABNT, 2018): “Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto”, define a forma para realização da análise petrográfica das amostras de rochas que serão utilizadas para a produção de agregados do concreto, evidenciando os equipamentos utilizados e os procedimentos de análise do ensaio; a classificação do agregado quanto à RAA em potencialmente inócuo ou reativo; e as informações que deverão estar contidas no relatório do ensaio.

A parte 4, NBR 15577-4 (ABNT, 2018): “Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado”, determina através do ensaio acelerado a alteração permitida no comprimento das barras de argamassa, bem como a predisposição de um agregado influenciar na reação álcali-sílica na presença de íons hidroxilas associados aos álcalis do cimento. A norma determina as etapas para a realização do ensaio como o preparo do agregado e do cimento, a dosagem utilizada, forma de misturar e moldar, cura, leitura dos resultados, cálculos e relatórios realizados. Além disso, são apresentados os aparelhos utilizados no ensaio, as condições de temperatura e umidade.

A parte 5, NBR 15577-5 (ABNT, 2018): “Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado”, detalha o preparo das barras de argamassa utilizadas para o ensaio acelerado para definir a suscetibilidade do cimento em atenuar a expansão das mesmas construídas com agregados com potencial reativo. Além disso, o cimento pode ser combinado com adições e a norma abrange todos os procedimentos para a realização do ensaio, bem como os cálculos, dados apresentados no relatório e dosagem.

A parte 6, NBR 15577-6 (ABNT, 2018): “Determinação da expansão em prismas de concreto”, detalha os procedimentos de um ensaio para ponderar o quanto um agregado é passível a participar da reação álcali-sílica na presença dos hidróxidos alcalinos, ou seja, estudar se o agregado será reativo ou não. Nesse método ocorre a adição do hidróxido de sódio para acelerar a expansão da barra, durante o tempo de 365 dias. Ademais, essa parte da norma auxilia na investigação das medidas mitigatórias para conter a reação.

A parte 7, NBR 15577-7 (ABNT, 2018): “Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado”, determina um ensaio acelerado para averiguar através da

alteração do comprimento de prismas de concreto, o quanto um agregado é susceptível a participar da reação álcali-sílica na presença de íons hidroxilas associados ao álcali do cimento, considerando o acréscimo de hidróxido de sódio por 20 semanas com requisitos de temperatura de 60°C.

2.3 Ensaios normativos para identificação da reatividade dos agregados

2.3.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica é uma investigação utilizada para determinar o potencial reativo dos agregados, com o auxílio de lâminas delgadas de 30 mm de espessura, microscópio petrográfico e equipamentos adicionais. Ela é realizada através do estudo microscópico e macroscópico de amostras de rochas ou minerais que constituem os agregados. Dessa forma, é possível identificar as fases prejudiciais ao concreto, além de fornecer informações importantes acerca dos agregados como: composição mineralógica, arranjo estrutural, textura, formato e granulometria dos minerais (ARRAIS, 2011).

Os procedimentos devem ser realizados por profissional qualificado capaz de executar as seguintes análises: examinar a amostra macroscopicamente, registrar cor, estrutura e classificá-la quanto ao tipo; determinar propriedades físico-mecânicas; examinar microscopicamente e definir a textura, granularidade e composição mineralógica; estimar teor da fase deletéria e a quantidade de quartzo microgranular; definir natureza, estado microfissural e alterações da rocha. Dessa forma, a partir da análise petrográfica será possível classificar o agregado em potencialmente inócuo ou reativo (NBR 15577-3; ABNT, 2018).

De acordo com a norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018), a análise petrográfica de agregados fornece dados importantes para auxiliar na identificação da manifestação da reação álcali-agregado, por meio do estudo da reatividade do material. Todavia, essas informações são insuficientes para averiguar e prever a potencial expansão e degradação que a reação pode ocasionar na estrutura.

2.3.2 Método acelerado das barras de argamassa

Arrais (2011) descreve que o método acelerado das barras de argamassa foi desenvolvido para permitir uma avaliação mais rápida da RAS, logo, a partir dele, é possível definir se um agregado tem comportamento deletério. Inicialmente, as barras são moldadas a

partir do traço normatizado com agregado, cimento padrão e água, com a exigência de uma relação água-cimento de 0,47. Posteriormente, após 24 horas, essas barras de argamassa são desmoldadas e imersas em água por mais 24 horas em temperatura de 80°C, avaliando-se após a cura o comprimento das barras. Por fim, elas são mergulhadas em uma solução de hidróxido de sódio sob a mesma temperatura anterior, anotando-se as leituras de expansão da barra. As dimensões da barra são aferidas em pelo menos três leituras intermediárias entre cada período, nas idades mínimas de 16 dias e 30 dias após a moldagem das barras.

Este método de avaliação é o mais frequentemente utilizado, devido ao curto prazo para avaliar a reatividade de um agregado, além de possibilitar, com o auxílio da norma NBR 15577-5, avaliar maneiras de evitar às expansões decorrentes da reação. A norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018) define as seguintes classificações para a potencialidade dos agregados de acordo com os resultados do ensaio após o período de 30 dias: expansões inferiores a 0,19%, comportamento inócuo e expansões superiores a essa porcentagem, agregado potencialmente reativo. Entretanto, para confirmar esses resultados, deverá ser realizado o ensaio de longa duração dos prismas de concreto.

Na FIG. 5 é possível observar alguns processos utilizados para a realização do ensaio das barras de argamassa.

Figura 5 – Alguns processos do método acelerado das barras de argamassa.



Fonte: Couto (2008, p.91). Adaptado pela autora.

2.3.3 Método acelerado dos prismas de concreto

O método acelerado dos prismas de concreto é caracterizado como uma variação do ensaio dos prismas de concreto, alterando-se a temperatura de exposição de 38°C para 60° C. Nesse sentido, o intuito desse modelo é diminuir a duração de realização do ensaio para 20 semanas no lugar de um ano, através da elevação da temperatura, que é a principal responsável pela velocidade das reações (NOGUEIRA, 2010).

A NBR 15577-7 (ABNT, 2018) define que neste método, caso o resultado indicar expansão inferior a 0,03 % na idade de 20 semanas, o agregado é considerado potencialmente inócuo para uso em concreto, porém, valores acima desse caracterizam o agregado como potencialmente reativo.

A FIG. 6 representa algumas etapas para a realização do método dos prismas de concreto, indicando a preparação do concreto em betoneira, a moldagem e estocagem das barras e as leituras das expansões ocorridas nas mesmas.

Figura 6 – Alguns processos do método acelerado dos prismas de concreto



(a) Preparação do concreto em betoneira



(b) Moldagem em mesa vibratória



(c) Condição de estocagem dos corpos de prova



(d) Leitura das expansões dos prismas

Fonte: Couto (2008, p.94). Adaptado pela autora.

2.3.4 Método de longa duração dos prismas de concreto

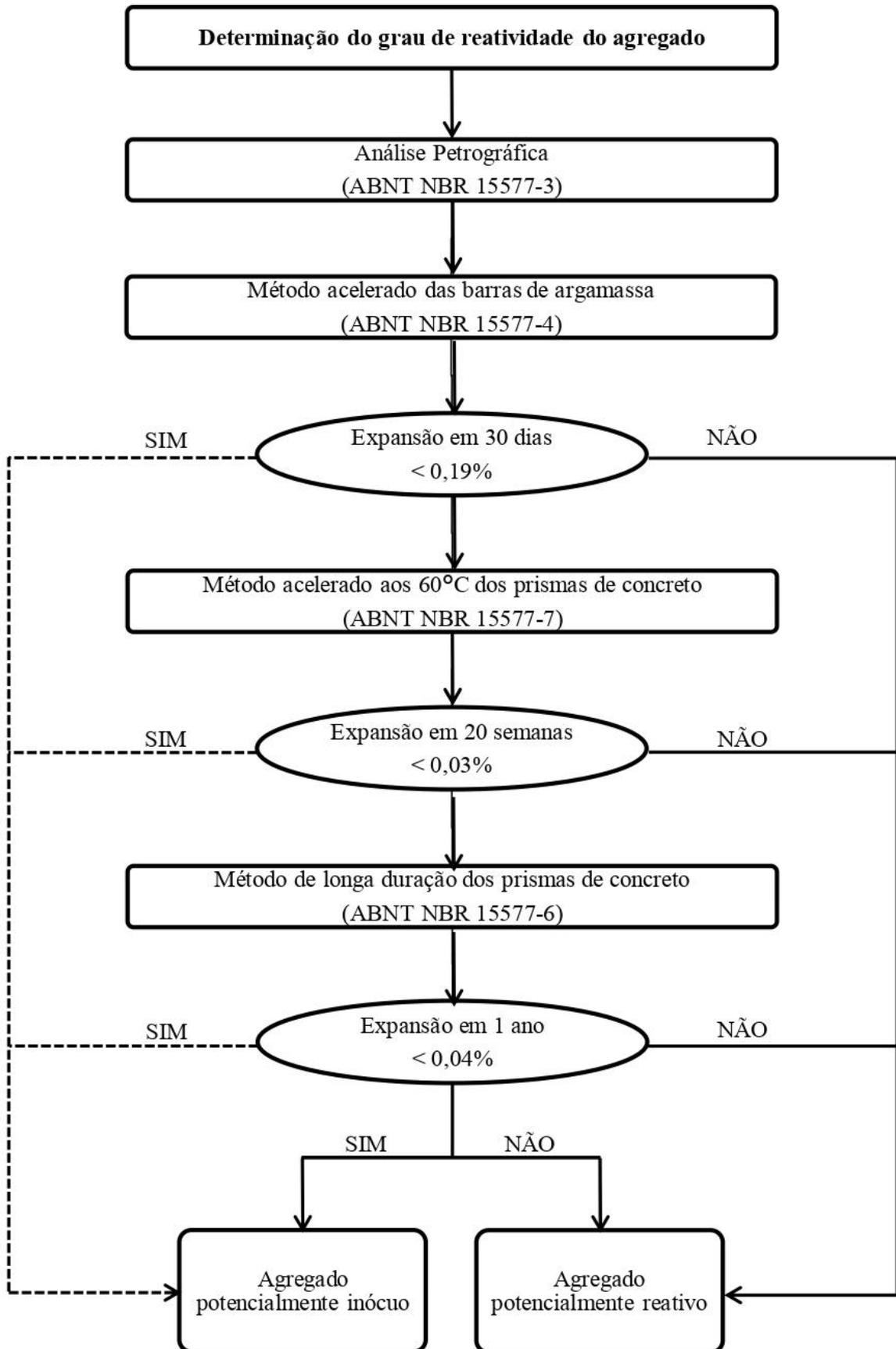
Nogueira (2010) esclarece que o método dos prismas de concreto permite detectar o potencial reativo de rochas, das quais o agregado é produzido. Assim, são moldados três prismas de concreto que são submetidos a um tanque de cura pelo período de 24 horas. Após a desforma, é realizada a leitura da expansão da barra e o material é acondicionado em recipientes específicos a uma temperatura de 38°C. As leituras das expansões são realizadas nas idades de 7, 28 e 56 dias inicialmente, passando-se para verificações dos 3 aos 12 meses, sendo, no mínimo, uma medição em cada mês. Depois da análise dos resultados, tem-se como parâmetro que as expansões inferiores a 0,04% após 1 ano caracterizam o agregado como inócuo, enquanto valores superiores a esse critério o caracterizam como potencialmente reativo.

Gomes (2008) completa que os prismas de concreto devem ser fabricados a partir de traços normativos com uma relação água cimento de 0,45, devendo ser adicionado hidróxido de sódio à solução. Além disso, os prismas devem ser armazenados em recipientes fechados hermeticamente, com a atmosfera da amostra saturada.

De acordo com norma NBR 15577-6 (ABNT, 2018), quando se utiliza o método dos prismas de concreto, é possível determinar o comportamento deletério tanto de agregados graúdos quanto de agregados miúdos. Dessa forma, para avaliar o potencial reativo dos agregados miúdos, deve ser utilizado um agregado graúdo potencialmente inócuo com as características especificadas pela norma, o mesmo processo é seguido para determinar a reatividade dos agregados graúdos, através do uso de um agregado miúdo sem características reativas. Além disso, esse ensaio auxilia na investigação da eficiência da mitigação empregada, porém, a duração do ensaio deverá ser de 2 anos.

A partir do FLUXOGRAMA 1 é possível observar um resumo dos ensaios normativos e a determinação da sequência dos procedimentos normativos para análise do potencial reativo dos agregados. Nota-se que quando a linha for contínua, preferencialmente, devem ser seguidos os processos indicados, enquanto para a linha tracejada, sugere-se elevar a classe de reatividade do agregado em um nível.

Fluxograma 1 – Determinação do grau de reatividade dos agregados



Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p. 13). Adaptado pela autora.

2.4 Consequências da reação na vida útil de uma estrutura de concreto

A reação álcali-agregado pode acarretar no concreto patologias irreversíveis, como microfissuras, desencadeando a perda de resistência mecânica, homogeneidade e durabilidade. Dessa forma, essas microfissuras se desenvolvem especificamente na argamassa contida entre os agregados graúdos ou próximo a sua superfície, promovendo a perda progressiva da aderência entre esses materiais (NOGUEIRA, 2010).

Para Rodrigues (2014), o gel produzido pela reação favorece a ocorrência das deformações estruturais, promovendo a diminuição das propriedades mecânicas e elásticas do concreto, como a resistência e módulo de deformação. Em concordância, Arrais (2011) completa que as degradações sofridas culminam na dificuldade de recuperação da estrutura, afetando a vida útil da mesma, através de expansões, fissurações, movimentos diferenciais e redução das resistências à tração e compressão.

As patologias comumente encontradas em estruturas de concreto devido à RAA são as fissuras em formato de mapa, a exsudação de gel, surgimento de bordas na superfície dos agregados, cobrimento dos poros com material branco ou vítreo, perda de estanqueidade, deslocamento e descoloração do concreto (HASPARYK, 2005).

Silva (2007) pontua que com o aumento dos números de estruturas atingidas pelas expansões provocadas pela reação álcali-agregado, torna-se necessário adotar medidas de manutenção e acompanhamento dessas obras, com o objetivo de evitar que essas obras não atinjam o estado limite de utilização ou serviço. Nesse sentido, as medidas mitigatórias e de recuperação da estrutura têm uma importante função de prolongar a vida útil das mesmas.

Nos últimos tempos, vários pesquisadores têm buscado formas de prever a vida útil de uma estrutura de concreto e os danos causados a elas pela RAA. Atualmente, já estão disponíveis modelos de previsão, que se distinguem pela concepção, dados de entrada, escala de abordagem, dentre outras. Estes modelos dividem-se em modelos empíricos (não têm como base dados físicos, logo, são limitados para o campo preditivo); analíticos (caracterizados por ser simples e por representarem globalmente os fenômenos, considerando indicadores de desempenho, porosidade, durabilidade físico-químico, estado hídrico, etc.); ou numéricos (detalham a física dos fenômenos, considerando mecanismo de transporte, equilíbrios químicos, velocidade das reações, porosidade, logo, para este grau de complexidade esses seriam os mais indicados) (CARASEK; CASCUDO; CAETANO, 2016).

2.5 Prevenção e Mitigação

2.5.1 Medidas mitigatórias normativas

De acordo com a norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018) para se determinar a medida mitigatória a ser utilizada, deverá ser realizada a classificação da estrutura, essa, por sua vez, depende da severidade e das consequências que poderão ocorrer na mesma devido à RAS. Assim, a norma classifica as estruturas da classe A à classe D, sendo que, na última, as consequências são de maior gravidade como indicado no QUADRO 1 a seguir.

Quadro 1- Classificação da estrutura

CLASSIFICAÇÃO DA ESTRUTURA	CONSEQUÊNCIA DA RAS	EXEMPLOS
Classe A	Pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Estruturas temporárias (menor que cinco anos de vida útil), elementos não expostos à umidade, elementos não estruturais, canteiros de obras.
Classe B	Moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Calçadas, calhas, telhas, muros, etc.
Classe C	Significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos, postes, alvenarias de vedação, tubulões, barreiras de segurança, elementos pré-fabricados, estradas com baixo volume de tráfego, dormentes, etc.
Classe D	Sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Pontes, estádios, hidrelétricas, barragens, instalações nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água ou resíduos, túneis, elementos estruturais de difícil inspeção.

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p.3-4). Adaptado pela autora.

Segundo os princípios normativos da NBR 15577-1 (ABNT, 2018), a partir do QUADRO 2 é possível determinar o grau de reatividade dos agregados, considerando os resultados obtidos nos ensaios das barras de argamassa aos 30 dias e do ensaio de expansão do prisma de concreto aos 365 dias. Dessa forma, após classificar a reatividade de um agregado variando de R0 a R3, pode-se determinar pelo QUADRO 3, o grau de risco de ocorrência da reação álcali-sílica, cuja determinação dependerá das dimensões dos componentes de concreto, da reatividade do agregado e do nível de exposição da estrutura.

Quadro 2- Classificação do grau de reatividade do agregado

CLASSIFICAÇÃO DA REATIVIDADE POTENCIAL DO AGREGADO	EXPANSÃO DAS BARRAS DE ARGAMASSA (30 DIAS)	EXPANSÃO DOS PRISMAS DE CONCRETO (365 DIAS)
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19 %	Menor que 0,04 %
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 e 0,40 %	Entre 0,04 e 0,12 %
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 e 0,60 %	Entre 0,13 e 0,24 %
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60 %	Maior que 0,24 %

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p.5). Adaptado pela autora.

Quadro 3- Grau de risco de ocorrência da RAS

DIMENSÕES E CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO	CLASSE DE REATIVIDADE DO AGREGADO			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito Alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito Alto

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p.6). Adaptado pela autora.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2018) define que a partir da classe da estrutura e do grau do risco de ocorrência da RAS é possível determinar o grau de intensidade da medida preventiva (QUADRO 4), que permitirá encontrar opções para mitigar a expansão (QUADRO 5). É fundamental realizar os ensaios do método acelerado em barras de argamassa ou o método dos prismas de concreto para comprovar a eficácia da mitigação escolhida.

Quadro 4- Grau de intensidade da medida preventiva

RISCO DE OCORRÊNCIA	CLASSE DA ESTRUTURA			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Desprezível	MP 0	MP 0	MP 0	MP 0
Mínimo	MP 0	MP 0	MP 1	MP 2
Moderado	MP 0	MP 1	MP 2	MP 3
Alto	MP 0	MP 3	MP 4	MP 4
Muito alto	MP 0	MP 4	MP 4	MP 4

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p.8). Adaptado pela autora.

Quadro 5- Medidas de mitigação da expansão devido à RAS

GRAU DE INTENSIDADE DA MEDIDA PREVENTIVA	OPÇÃO 1	OPÇÃO 2	OPÇÃO 3
MP 0	Nenhuma ação é necessária		
MP 1	Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ de Na ₂ O equivalente.	Utilizar cimentos: CP II-E ou CP II-Z, conforme a ABNT NBR 11578 ou CP III, conforme a ABNT NBR 5735 ou CP IV, conforme ABNT NBR 5736.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 2.
MP 2	Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60 % de escória, conforme ABNT NBR 5735.	Utilizar cimento CP IV com no mínimo 30 % de pozolana, conforme ABNT NBR 5736.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 3.
MP 3	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação da reatividade pelo ensaio de prismas de concreto aos dois anos.	Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de grau de intensidade 4.
MP 4	Utilizar materiais inibidores comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio acelerado.	Utilizar materiais inibidores, comprovando a mitigação da reatividade pelo ensaio de prismas de concreto aos dois anos.	Trocar o agregado.

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p.9). Adaptado pela autora.

A partir do QUADRO 5 é possível observar maneiras de mitigação da reação álcali-silica sugeridas pela norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018), de acordo com o grau de intensidade da medida preventiva encontrada pelo QUADRO 4. Nesse sentido, a norma apresenta possíveis soluções para mitigar a reação, dentre as quais pode-se citar a limitação do teor de álcalis no concreto, utilização de cimentos especiais como CP II-E (cimento Portland composto com adição de escória), CP II- Z (cimento Portland composto com adição de pozolona), CP III com adição mínima de 60% de escória e CP IV com no mínimo 30% de pozolona. Outras formas de mitigação estabelecida pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018) é o uso de materiais inibidores e troca dos agregados.

Os requisitos de composição de materiais inibidores e os parâmetros para a avaliação dos resultados do seu uso são obtidos pela realização dos ensaios e estão indicados no QUADRO 6.

Quadro 6- Requisitos de composição dos materiais inibidores

MATERIAL INIBIDOR	REQUISITOS DA COMPOSIÇÃO
Cimento Portland tipo CP II E e CPIII	Cimentos Portland com teores de escória granulada de alto-forno suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,19 % aos 30 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 % em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.
Cimento Portland tipo CPII-Z e CPIV	Cimentos Portland com teores de materiais pozolânicos suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,19 % aos 30 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 % em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.
Sílica ativa e metacaulim ou outros materiais pozolânicos em combinação com qualquer tipo de cimento Portland	Sílica ativa, metacaulim e materiais pozolânicos, com composição que atenda, respectivamente, às ABNT NBR 13956-1, ABNT NBR 15894-1 e ABNT NBR 12653. Os teores necessários dessas adições normalizadas devem ser suficientes para promover a mitigação das expansões a níveis inferiores a 0,19 % aos 30 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 %, em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018, p.10). Adaptado pela autora.

Todavia, a reação só irá findar quando os reagentes (álcalis, minerais reativos e água) acabarem, independentemente da quantidade de gel produzido, visto que o processo químico é limitado pela quantidade de reagentes e não de produto formado. Dessa forma, quando se trata da reação álcali-agregado, é fundamental avaliar e investir nas medidas de prevenção e mitigação, já que não existe um método completamente eficiente e capaz de extinguir os efeitos da RAA quando a mesma se manifesta. Alguns métodos de prevenção utilizados serão tratados nos tópicos subsequentes (ZAMBOTTO, 2014).

2.5.2 Escolha do agregado

A situação mais favorável para se evitar as manifestações patológicas causadas pela RAA é utilizar agregados não reativos, mas, às vezes, é inviável essa substituição, principalmente em situações em que a empresa de fornecimento do agregado encontra-se

muito distante da obra. Por isso, é fundamental conhecer as características do agregado a partir dos ensaios normativos para avaliar a melhor opção preventiva (GOMES, 2008).

2.5.3 Limitação dos álcalis do cimento

Silva (2007) pontua que limitar o teor de álcalis presente no cimento pode ser uma medida preventiva em relação à RAA, assim, é indicado utilizar cimentos com teor de álcalis inferior a 0,6%. Porém, esse limite não assegura que a medida mitigatória seja efetiva, uma vez que outras origens externas de álcalis podem contribuir na reação. Nogueira (2010) afirma que alguns tipos de cimento também são utilizados na tentativa de evitar o surgimento da reação, como o cimento Portland de alto-forno (CP III) e o pozolânico (CP IV).

2.5.4 Aditivos químicos

Uma das possíveis soluções para inibir o desenvolvimento da reação álcali-agregado é adicionar ao concreto aditivo químico, podendo utilizar soluções de silano para promover a impermeabilização dos grãos que constituem os agregados, ou soluções de sais de lítio para tentar diminuir a expansão do gel. Quando se utiliza o lítio, há uma queda na dissolução da sílica proporcional ao aumento do teor de lítio, dessa forma, ocorre a formação de um gel sem caráter expansivo (NOGUEIRA, 2010).

2.5.5 Aditivos minerais

As adições minerais são materiais silicosos finos, advindos da queima de carvão. Estes materiais aumentam a durabilidade do concreto e sua resistência aos ataques químicos e de expansão decorrentes da reação álcali-agregado, entre elas destacam-se para minimizar o processamento da reação as escórias de alto forno e os materiais pozolânicos (cinzas volantes, argilas calcinadas). Atualmente, vem sendo verificada a viabilidade de se utilizar o metacaulim como uma adição mineral para combater a RAA. Esse produto é proveniente procedimento de tratar certos tipos de resíduos, como por exemplo, os produzidos pela indústria de papel (NOGUEIRA, 2010).

Ribeiro (2018) completa que a principal vantagem da pozolana é diminuir a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, reduzir a mobilidade dos produtos reagentes em seu interior. Dentre as adições pozolânicas pode-se citar para a prevenção da

reação álcali-sílica: cinza de casca de arroz, cinza volante, sílica ativa e pozolanas naturais. Segundo Nogueira (2010), em proporções adequadas, essas adições são capazes de fazer com que os álcalis solúveis sejam utilizados antes que os hidróxidos reajam com a sílica dos agregados, evitando, assim, a expansão deletéria. Entretanto, para assegurar a eficiência da mitigação, é preciso que não haja interferência de álcalis de origens externas.

2.6 Recuperação da estrutura

Quando a reação se inicia é difícil extinguir os seus impactos degradadores na estrutura, assim, algumas propostas para minimizar ou retardar os efeitos da RAA no concreto são listadas a seguir. Porém, caso nenhuma medida seja eficiente, é recomendada a demolição e reconstrução da estrutura (GOMES, 2008).

2.6.1 Tratamentos superficiais

Esse método é baseado na tentativa de reduzir a infiltração de água e umidade nos poros do concreto, ou seja, realizar a impermeabilização, restringindo-se à utilização de materiais com propriedades elásticas, para esses não sofrerem fissurações ou rompimento decorrentes da expansão da reação álcali-agregado. É indicada a utilização de pinturas à base de silano, uma vez que evitam a passagem de umidade e contribui com secagem, e produtos injetáveis ou espalháveis à base de lítio, que auxiliam na redução da expansão do gel (GOMES, 2008).

2.6.2 Reforços e proteções estruturais

Os reforços estruturais se caracterizam como a limitação da livre expansão do concreto, atuando por meio de protensões ou da ampliação das seções de concreto e armadura. Ademais, é usual realizar o encapsulamento dos elementos estruturais para assegurar que não ocorra mais penetração dos reagentes no concreto (GOMES, 2008).

Silva (2007) afirma que o reforço é utilizado para reabilitar as estruturas, entretanto, demanda estudos mais avançados para sua concepção. Uma característica desse método é limitar os esforços de expansão, confinando-os através da criação de uma força de compressão superior a de expansão.

Outra medida para proteção da estrutura é viabilizar a liberação das deformações. Para abrandar os impactos da reação na estrutura de concreto cria-se juntas, objetivando autorizar a

expansão em sentido controlado na direção dessas. Dessa forma, as pressões ocasionadas pela RAA na estrutura serão aliviadas (GOMES, 2008).

Na FIG. 7 é mostrado o posicionamento das armaduras para reforço estrutural para realização do encapsulamento do bloco de fundação.

FIGURA 7- Armadura de reforço do encapsulamento do bloco



Fonte: Gomes (2008, p. 127)

2.6.3 Membranas

Segundo Gomes (2008) o sistema de membranas atua como uma obstrução externa que protege os elementos de concreto contra a entrada de umidade, que é a principal responsável pela expansão do gel. Nesse modelo de recuperação podem ser utilizadas mantas asfálticas (podem gerar problemas devido a sua validade e fragilidade) e mantas de PVC empregadas por cima de geotêxteis.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reação álcali-agregado é considerada uma das formas de degradação mais prejudiciais ao concreto, principalmente pelo desafio de conter a sua manifestação quando ela é iniciada. Esta reação é capaz de alterar propriedades importantes do material como as propriedades elásticas e resistência mecânica, ocasionando fissurações, deslocamentos e movimentos diferenciais. Dessa forma, quando a RAA ocorre nas estruturas, é necessário acompanhamento contínuo para assegurar que não seja reduzida a durabilidade da estrutura.

Considerava-se no início que a reação se desencadeava apenas em obras de contato direto com água, como barragens e pontes, todavia, a reação também foi detectada em blocos de fundação, causando preocupação no meio científico. Essas estruturas de concreto são as mais propícias de serem afetadas pela ação desse fenômeno devido às condições em que são expostas.

Para que a reação deletéria se desencadeie é necessária à presença concomitante de água, hidróxidos alcalinos e agregados reativos. Nesse sentido, ocorre a formação do gel higroscópico que aumenta seu volume através da absorção de água.

Dessa forma, os ensaios normativos para previsão da reatividade dos agregados permitem obter informações importantes para avaliar a melhor forma de mitigação, contudo, eles não auxiliam na previsão das consequências que a reação poderá causar na estrutura. Assim, o melhor caminho é a prevenção e mitigação, uma vez que não há soluções efetivas para recuperar a estrutura. Nesse sentido, a troca do agregado reativo é a melhor forma de mitigação, porém, quando não for possível, buscam-se como solução as adições minerais e cimentos especiais. As tentativas de recuperação da estrutura englobam os reforços estruturais e impermeabilização da estrutura. Em casos em que a medida de recuperação não for efetiva, é recomendada a demolição e reconstrução da edificação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577– 1**. Agregados– Reatividade Álcali-Agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 15577 – 2**. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 15577 – 3**. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 15577 – 4**. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão de barras de argamassa pelo método acelerado. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 15577 – 5**. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 15577 – 6**. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

____. **NBR 15577 – 7**. Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.

ARRAIS, Miguel Sebastião Maia Chaves. **Reação álcali-silicato**: avaliação do comportamento de agregados graúdos da região metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimento. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/4909/1/arquivo2634_1.pdf>. Acesso em: 25 set. 2021.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. Divulgando conhecimento sobre a RAA para sua prevenção. **Concreto e Construções**, São Paulo, n. 83, p. 7-8, jul./set. 2016. Disponível em: <http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao83/files/assets/basic-html/page1.html>. Acesso em: 28 ago. 2021.

BRAVO, Mariana Campos *et al.* Adequação de concreto para evitar RAA, um estudo de caso: modernização de um estádio para a copa de 2014. *In*: V CONGRESSO INTERNACIONAL NA “RECUPERAÇÃO MANUTENÇÃO E RESTAURAÇÃO DE EDIFÍCIOS”, n.5, 2020, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: 2020. Disponível em: <<https://wordpress.ft.unicamp.br/mats/wp-content/uploads/sites/29/2021/05/437-ARTIGO-FINAL-CIRMARE-2020-1-1.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2021.

CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo; CAETANO, Geovanne. Contribuição à previsão de danos para estruturas de concreto atacadas pela reação álcali-sílica. **Concreto e Construções**, São Paulo, n. 83, p.30-38, jul./set. 2016. Disponível em: <<http://ibracon.org>.

br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao83/files/assets/basic-html/page1.html>. Acesso em: 28 ago. 2021.

COUTO, Tiago Andrade. **Reação álcali-agregado**: estudo do fenômeno em rochas silicosas. 2008. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3166>> . Acesso em: 09 out. 2021.

GOMES, Eduardo Alves de Oliveira. **Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado**: a experiência do Recife. 2008. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/bitstream/tede/35/1/dissertacao_eduardo_alves.pdf>. Acesso em: 04 set. 2021.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6350/000528715.pdf?sequence=1>> . Acesso em: 11 set. 2021.

LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008.56 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Pós- Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/49106871/Patologia_Recuperacao_e_Reparo_das_Estruturas_de_Concreto-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1637606459&Signature=TSWwVy-Wlwl1knxupHUw~yDZDNdYJEnjGcMYdYZW3-iDN8mTV3hJlgYTMGKDj3DjCOLItCR~guQAgRqco3UaS2VFyAl2jILMtuInktsix3HC0aR5MYO9OrlXeXAPXIS7XT~aDVdtsggFY9HuWpO5aUUZdeW6DwMskCbeY0WV~5hEtfQNvdUCQ6a0xInSxxPGMy1Nc8ephMbj5LakujabyGPwzkw8yTBj9FfCf85ssiJUliUbbuAzlTfvx8cZZEIL6TjkwUs2aCTHHSXKTEStplWFMfnjxx4pSCB4~LD-QwxAH2wlyvy79gRrjQu81nXl7CfxaVXI--4y0v5d2A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA>. Acesso em: 18 set. 2021.

LUCCA, Ana Carolina Kamura de. **Reação álcali-agregado**: efeito do uso de cinza volante. 2010. 97 f. Monografia (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26021/000754966.pdf?sequence=1&locale-attribute=pt_BR>. Acesso em: 06 nov. 2021.

MIZUMOTO, Camilo. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91463/mizumoto_c_me_ilha.pdf?sequence=1>. Acesso em: 09 out. 2021.

NEVILLE, Adam M; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini . 2. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2013. 472 p. Cap. 14. p. 215-276. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788582600726/pageid/2>>. Acesso em: 18 set. 2021.

NOGUEIRA, Kelso Antunes. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. 2010. 93 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9A5HJ4/1/monografia_kelso.pdf>. Acesso em: 11 set. 2021.

OTOCH, Sérgio. Reação álcali-agregado: o que é e como evitar?. **Concreto e Construções**, São Paulo, n. 83, p. 27-29, jul./set. 2016. Disponível em: <http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao83/files/assets/basic-html/page1.html>. Acesso em: 28 ago. 2021.

RIBEIRO, Daniel Verás. Deterioração das estruturas de concreto. In: ____ .**Corrosão e degradação em estruturas de concreto**. 2º ed. Rio de Janeiro: GEN, 2018. Cap. 7, p. 158-189. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595152359/>>. Acesso em: 29 ago. 2021.

RODRIGUES, Edmilson Correia. **Análise numérica do efeito de fatores influentes da reação álcali-agregado no desempenho de estruturas de concreto**. 2014. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de tecnologia, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14855/1/EdmilsonCR DISSERT.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

SILVA, Geovani Almeida da. **Recuperação de blocos de coroamento afetados pela reação álcali-agregado**. 2007. 130f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia das Construções) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007. Disponível em: <<http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/22>>. Acesso em: 16 out. 2021.

ZAMBOTTO, Danielle. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado nas respostas estruturais de pavimentos de concreto**. 2014. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade Camilo Castelo Branco, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-05012016154709/publico/Dissertacao_Danielle_Zambotto.pdf>. Acesso em: 16 out. 2021.