Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: UM BREVE ESTUDO DA OCORRÊNCIA NOS BLOCOS DA PONTE PAULO GUERRA – RECIFE/PE

AGUINALDO BRITO JUNIOR
Graduando em Engenharia Civil
Escola de Engenharia de Piracicaba
SP; Brasil
aguinaldobjr@gmail.com

IVAN PASSUELO FERRO
Graduando em Engenharia Civil
Escola de Engenharia de Piracicaba
SP; Brasil
ivan91@terra.com.br

RESUMO

Mesmo com o avanço consolidado da tecnologia do concreto e a evolução dos conhecimentos ligados à boa prática da engenharia, muitas estruturas desenvolvem, em maior ou menor proporção, manifestações patológicas que reduzem a durabilidade e prejudicam a estabilidade de uma edificação. Há, entre tais anomalias, aquelas que merecem maior atenção, devido à expressividade de seus efeitos. Um dos mecanismos de degradação que se enquadra nestas circunstâncias é a reação álcali-agregado (RAA), considerada, até os dias atuais, uma doença incurável, mesmo que investigada desde os idos de 1940. O presente artigo reúne os conceitos fundamentais da RAA, transitando entre as principais informações já consagradas e amplamente discutidas na literatura técnica. Com o objetivo de demonstrar, na prática, os efeitos deletérios da reação, além de apresentar o diagnóstico e as medidas mitigadoras aplicáveis, o trabalho relata um estudo de caso referente ao ocorrido em blocos de fundação da Ponte Paulo Guerra, situada na cidade do Recife/PE, episódio que marcou a engenharia brasileira e mundial que trata sobre o tema.

Palavras-chave: reação álcali-agregado, RAA, concreto, Ponte Paulo Guerra, Recife-PE.

ABSTRACT

Despite the consolidated advance of concrete technology and the increase of knowledge related to the good engineering practice, many structures develop pathological manifestations, in different proportions, which reduce the durability and threat the stability of the building. Some anomalies require more attention, due to the intensity of its effects. One of the degradation mechanisms under these circumstances is the alkali-aggregate reaction (AAR), which is considered, to date, an incurable disease, although studies have been conducted since the 1940s. This paper brings together the fundamental concepts of AAR, reviewing the main well-accepted and widely discussed information in the technical literature. In order to demonstrate, in practice, the deleterious effects of the reaction, in addition to present a diagnosis and the applicable mitigating measures, this article reports a case study on the occurred in foundation blocks of the Paulo Guerra Bridge, located in the city of Recife-PE. The episode marked the Brazilian and global engineering about the topic.

Keywords: alkali-aggregate reaction, AAR, concrete, Paulo Guerra Bridge, Recife-PE.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1 Considerações iniciais

Nas últimas décadas, houve um apreciável progresso no estudo da durabilidade das estruturas de concreto. Este parâmetro, que estabelece o comportamento daquele material diante da interação com o ambiente ao qual está inserido, determina, além de outros fatores, o atendimento à vida útil da construção. Assim, ao descumprir esse quesito, a estrutura estará sujeita a manifestações patológicas de distintos efeitos, muitas vezes reduzindo o desempenho requerido. Dentre os mecanismos de deterioração que atingem as obras encontra-se a reação álcali-agregado (RAA).

Proposta inicialmente por Stanton, em 1940, a RAA trata-se, em linhas gerais, de um problema vinculado a aspectos físicos, químicos e mineralógicos. O resultado da combinação entre as três condições é o impacto nocivo causado ao concreto: por se traduzir em um fenômeno de alto nível de complexidade, a reação não pode ser eliminada, apenas controlada através de soluções minimizadoras.

Neste artigo são representadas informações-base para o entendimento da questão. Propõe-se, também, em conformidade com os dados expostos, descrever a sua ocorrência e os seus desdobramentos nos blocos de fundação da Ponte Paulo Guerra, no Recife-PE.

2 Revisão de literatura

2.1 Caracterização da reação álcali-agregado

A expressão "reação álcali-agregado" (RAA) refere-se, resumidamente, a um mecanismo de degradação do concreto por meio da expansão gerada por reações químicas internas [1].

Estas reações, que podem se apresentar de diversos modos, ocorrem entre os componentes mineralógicos reativos presentes nos agregados e os álcalis dissolvidos no interior do concreto, sendo necessária a presença de umidade para que se desenvolva o fenômeno deletério. Distinguem-se, de acordo à fases contidas nos agregados e ao tempo de evolução da reação, a reação álcali-sílica (RAS), a reação álcali-silicato e a reação álcali-carbonato (RAC). Entretanto, atualmente a reação álcali-silicato é considerada um caso particular de reação álcali-sílica e a abordagem é feita em termos de RAS e RAC [2].

O mecanismo de degradação apresenta sintomas com aspectos em pequena e grande escalas. Em pequena escala, observa-se: fissuras, próximas aos agregados ou em sua própria superfície; microfissuras entre agregados graúdos; perda de aderência entre pasta e agregado; ocorrência de reação nas bordas dos agregados; e gel exsudado nos vazios do concreto. Já os aspectos em grande escala contemplam diversos tipos de fissuras de dimensões maiores que as anteriores, além de movimentações da estrutura e presença de gel exsudado entre as fissuras [1].

2.2 Histórico

Na década de 1920, foram constatados os primeiros problemas decorrentes da RAA, na Califórnia, nos Estados Unidos [3]. Desde então, seus efeitos têm sido identificados em muitas regiões do mundo, a exemplo da Dinamarca (déc. de 1950), da Alemanha Ocidental (déc. de 1960), do Reino Unido (déc. de 1970) e do Japão (déc. de 1980), confirmando-se em mais de 50 países [4].

No Brasil, foram feitos estudos na década de 1960 para a construção da barragem de Jupiá, nos quais constatou-se a presença de calcedônia – mineral potencialmente reativo. Estes estudos marcaram o início dos trabalhos abordando a RAA no país e seus resultados motivaram entidades como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) a aprofundarem o conhecimento sobre o assunto. Nos anos 1990, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) confirmou a ocorrência de RAA em cinco barragens e em uma base para equipamento de grandes dimensões [5].

Houve uma grande quantidade de casos identificados em barragens e fundações na Região Metropolitana do Recife. Destes, um dos que mais se destacam foi o ocorrido nos blocos da fundação da Ponte Paulo Guerra, em 2002, que será mais largamente abordado neste trabalho [7] [8].

2.3 Fatores influentes e fatores condicionantes

Os agregados reativos, de acordo à norma ABNT NBR 15577-1:2008, são aqueles que, reagindo com solução alcalina presente nos poros do concreto ou oriundas de fontes externas, causam o aparecimento de manifestações patológicas típicas de RAA.

Todos os silicatos ou minerais de sílica, bem como a sílica amorfa (obsidiana, vidro de sílica) e a sílica hidratada (opala) podem reagir com os álcalis, embora boa parte de modo inexpressível [3]. A reatividade costuma ser baixa para as estruturas cristalinas de sílica e alta para as amorfas [9].

Os álcalis são derivados de sódio e potássio que podem se solubilizar, tornando-se reagentes. São oriundos principalmente do cimento, mas podem se apresentar nos demais constituintes do concreto (agregados, adições minerais, aditivos e água de mistura) ou ainda estar disponíveis em fontes externas à estrutura (águas alcalinas de indústrias ou marinhas) [2].

A Figura 1 representa os fatores essenciais à formação da RAA.

Figura 1: Fatores condicionantes do fenômeno



Fonte: Couto (2008), p.62.

A umidade desempenha dupla função na RAA. A água realiza o transporte dos cátions alcalinos e dos íons hidroxila, possibilitando a ocorrência da reação; e é largamente absorvida pelo produto da reação, o gel de silicato alcalino, o qual expande e gera pressão hidráulica na pasta de cimento, possibilitando seu efeito deletério [10]. Uma baixa relação água/cimento reduz a porosidade do concreto e a movimentação da umidade interna. No entanto, maior será a concentração de íons alcalinos na solução dos poros e menor a quantidade de espaços vazios. Desse modo, a acomodação das tensões será menor, favorecendo a fissuração [3].

2.4 Aspectos químicos

Vários autores visualizam a RAA em dois estágios, descritos a seguir [11]. Contudo, estes estágios são precedidos pela reação entre os íons hidroxila (OH^-), presentes na solução alcalina dos poros do concreto, e a sílica reativa da superfície dos agregados, que origina ligações do tipo silanol (Si-OH), conforme a equação 1.

$$Si\text{-}O\text{-}Si^+ + OH^- \rightarrow Si\text{-}O\text{-}Si\text{-}OH \qquad \text{(Equação 1)}$$

No estágio 1, ocorre o ataque de íons hidroxila dissolvidos às ligações silanol, conferindo à sílica caráter ácido (SiO^-), conforme a equação 2. Segue-se o equilíbrio das cargas pelos íons alcalinos (Na^+, K^+), conforme a equação 3. Nesse estágio é gerado o gel.

$$Si\text{-}OH + OH^- \rightarrow Si\text{-}O^- + H_2O \qquad \text{(Equação 2)}$$

$$\begin{cases} Si\text{-}O^- + Na^+ \rightarrow Si\text{-}ONa \\ Si\text{-}O^- + k^+ \rightarrow Si\text{-}OK \end{cases} \qquad \text{(Equação 3)}$$

No estágio 2, os íons hidroxila, que estão em constante produção, promovem o ataque a ligações mais internas da sílica, caracterizadas pelo grupo siloxano (=Si-O-Si=), como ilustram as equações 4 e 5. Há adsorção de água e com isso a estrutura da sílica se desagrega, liberando monômeros de silicato solúveis (H_4SiO_4, $H_3SiO_4^-$ e $H_2SiO_4^{2-}$), como mostra a equação 6. Posteriormente, ocorre adsorção de íons alcalinos, como descrito pela equação 7.

$$Si\text{-}O\text{-}Si + 2OH^- \rightarrow Si\text{-}O^- + O^-\text{-}Si + H_2O \quad \text{(Equação 4)}$$

$$2SiO_2 + OH^- \rightarrow SiO_{5/2}^- + SiO_{5/2}H \quad \text{(Equação 5)}$$

$$SiO_{5/2}\text{-} + OH^- + ½\ H2O \rightarrow H_2SiO_4^{2-} \quad \text{(Equação 6)}$$

$$\begin{cases} H_2SiO_4^{2-} + 2Na \rightarrow Na_2H_2SiO_4 \\ H_2SiO_4^{2-} + 2K \rightarrow K_2H_2SiO_4 \\ H_2SiO_4^{2-} + Ca \rightarrow CaH_2SiO_4 \end{cases} \quad \text{(Equação 7)}$$

2.5 Medidas preventivas e mitigadoras

O emprego de adições minerais, seja na substituição de parte do cimento ou diretamente aplicado na fabricação do concreto, consiste em um mecanismo eficaz de evitar-se a RAA. Se corretamente dosados, tais materiais suplementares são caracterizados por diminuir a porosidade do concreto, bloqueando o acesso de água externa e de agentes agressivos ao seu interior. Ressalta-se, porém, que o tipo utilizado está condicionado às características, natureza e reatividade do agregado [2].

Dentre as variedades de adições existentes, enfatiza-se aquelas que são amplamente disseminadas e ao mesmo tempo comprovadamente úteis no sentido de combater a RAA.

A sílica ativa, rejeito industrial advindo da produção do ferrosilício, possui propriedades (extrema finura e pozolanicidade) que lhe conferem boa capacidade de inibição ao fenômeno deletério. Determinou-se, por meio de estudos, que o teor de 15%, sobre o consumo de cimento, reduz a chance de a reação acontecer. De semelhante qualidade e oriunda da combustão de carvão pulverizado nas usinas termoelétricas, a cinza volante também é um material de elevada finura, porém necessita de um maior teor para inibir a reação álcali-agregado [12]. Qualquer valor situado entre 30% e 40%, quando em troca ao cimento, deve representar uma saída válida nesse sentido [13].

Bons resultados foram obtidos usando escória de alto-forno, resíduo resultante da fabricação do ferro-gusa. Entretanto, cumpre-se apontar, conforme evidenciado em pesquisa, um teor mínimo de 40% para o impedimento [14]. Já o metacaulim, oriundo da calcinação de argilas, possui, basicamente, um comportamento unânime quanto ao seu teor, situado entre 8% e 15% [2]. Por último, vale mencionar a cinza da casca de arroz, procedente da obtenção do arroz, na qual indica-se uma quantidade ótima de 15% a fim de diminuir a possiblidade de ocorrência da RAA [15].

Julga-se importante ressaltar que a escolha de agregados não reativos também é uma maneira satisfatória de combater a reação [16].

Com o dignóstico da reação confirmado, quais sejam as condições da estrutura, surge a premente necessidade de lançar mão de medidas mitigadoras que têm por objetivo desacelerar o mecanismo degradante. Baseado neste pensamento terapêutico, é comum classificá-las em dois grupos: tratamento das causas e tratamento dos sintomas.

Os tratamentos das causas disponíveis propõem-se em extinguir a umidade por meio da secagem do concreto ou da aplicação de produtos que visam reorganizar as características da reação. A adoção de agentes hidrófobos (impregnantes, selantes, penetrantes e membranas), por exemplo, formam uma barreira protetora ao ingresso de água. Entre eles, destacam-se pinturas à base de silano e siloxano. Embora deva ser dosado com cautela, os compostos à base de lítio, decisivos na regulação das expansões, atuam na alteração da química do fenômeno [17]. O teor usado depende do tipo do composto, da origem do agregado reativo e da disponibilidade de hidróxidos alcalinos no concreto [18].

Por sua vez, os tratamentos dos sintomas procuram,essencialmente, resguardar a estabilidade do elemento afetado. São exemplos de intervenção: aberturas de juntas para atenuar tensões pontuais; calafetagem de fissuras, apesar de não

suspender o seu surgimento; e reforços estruturais, como o encapsulamento do concreto, crucial para garantir a integridade física da edificação [18].

2.6 Métodos de investigação da RAA

Os principais métodos laboratoriais dedicados à investigação dos produtos expansivos, à análise da reatividade dos agregados e às demais evidências da manifestação da reação são: análise petrográfica, método dos prismas de concreto e método acelerado em barras de argamassa.

A análise petrográfica, cujos preceitos são ditos na ABNT NBR 15577-2, consiste em estudar, em escalas macroscópica e microscópica, amostras de rochas de agregados, sendo a primeira etapa para reconhecer fases mineralógicas possivelmente reativas. Por tratar-se de tarefa que nem sempre implica em resultados confiáveis, torna-se primordial a condução do trabalho por um petrógrafo experiente [2].

Sob o ponto de vista da precisão dos resultados, a análise mais efetiva é o ensaio dos prismas de concreto. Apesar do método apresentar respostas de um certo agregado em relação à sua reatividade no período de um ano, seu grau de confiabilidade não incorre em possíveis distorções entre os dados obtidos em laboratório com os notados em campo [2].

Atualmente considerado o ensaio de maior emprego no mundo, o método acelerado em barras de argamassa – no Brasil recomendado pela ABNT NBR 15577-4 – afere a potencialiadade reativa de agregados miúdos e graúdos em até 30 dias, sendo esta uma de suas vantagens frente aos demais. Porém, esse método tem a desvantagem de, em alguns casos, induzir a resultados que não correspondem com aqueles observados na prática. Assim, é comum, após obter a análise, promover o ensaio dos prismas de concreto cuja validez é maior [2].

3 Estudo de caso: a RAA na Ponte Paulo Guerra – Recife/PE

3.1 Contextualização

Sabe-se que o fator umidade é um dos responsáveis para o fenômeno vir à tona, justificando o ataque da RAA em estruturas como barragens e hidrelétricas. Esta percepção não apenas se confirmava como também se fundamentava no conceito de que a reação se limitava a obras hidráulicas de grande porte. Outrora válida atualmente essa hipótese já está descartada.

Desde o início do século XX, a Região Metropolitana do Recife tem sido palco de centenas de confirmações da RAA em blocos de fundações, isto é, em pequenos elementos de concreto. Salienta-se que tais identificações foram obtidas em grande medida após a queda do edifício Areia Branca, em 2004, localizado em Jaboatão dos Guararapes, acontecimento este que conduziu a um importante aumento das inspeções em fundações, levadas adiante pelos proprietários e moradores das edificações. É importante esclarecer que o desabamento não guarda relações com a reatividade álcali-agregado [8].

A julgar pela profusão de casos e pela preocupação dos profissionais da construção civil envolvidos, entidades locais do setor se reuniram e promoveram sucessivas reuniões e debates com especialistas para lançar luz sobre o tema [19]. Gradativamente, o problema foi sendo tratado com maior naturalidade e a apreensão se converteu em uma experiência sem precedentes.

O primeiro diagnóstico, porém, ocorreu na Ponte Paulo Guerra, no Recife, em 1999. Particularmente, o quadro fissuratório encontrado nos blocos de coroamento após a diminuição do nível da maré denunciou o que mais tarde se comprovaria através de estudos laboratoriais [20].

Dado seu pioneirismo e significado, este trabalho discorrerá, nos itens a seguir, acerca da presença da RAA na referida ponte.

3.2 Descrição da ponte

Inaugurada em 1979, a Ponte Paulo Guerra situa-se sobre a bacia do Rio Pina e conecta os bairros recifenses da Cabanga e do Pina. É um importante ponto de acesso à zona sul da cidade [16].

A Figura 2 apresenta uma vista da obra de arte.

Figura 2: Vista da Ponte Paulo Guerra.



Fonte: Helene *et al.* (2006), p. 2.

Relativamente extensa, com comprimento de 453 m, a ponte é feita em concreto protendido. Possui nove vãos contínuos de 47 m e dois vãos de 15 m nas extremidades. A superestrutura é constituída por dois caixões unicelulares ligados pela laje superior e que repousam sobre blocos de apoio, inexistindo pilares. Estes caixões são ladeados por vigas cujas alturas no centro e sobre os apoios medem, respectivamente, 1,30 m e 6,00 m [16].

A concepção estrutural permitiu a sustentação dos apoios por dois blocos em cada um destes, de dimensões laterais idênticas (3,20 x 5,80 m) e altura diferente. Propiciou também a criação de cálices em concreto armado, responsáveis pelos revestimentos inferior e laterais daqueles elementos de fundação. Duas vigas transversinas dispostas sobre aparelhos de apoio em neoprene foram colocadas no lugar onde há o encontro entre os caixões e os blocos [16].

3.3 Danos observados e diagnóstico da RAA

A obra, localizada em uma atmosfera marinha e sujeita a respingo de maré, está em contato com agentes agressivos presentes na água salina e nos meios urbano e industrial. À luz da ABNT NBR 6118:2014, corresponde à classe de agressividade ambiental III e IV, classificada, nesta ordem, em forte e muito forte, impondo risco grande a elevado de degradação da estrutura.

No ínicio de 2002, a prefeitura do Recife decidiu investigar o estado da ponte em função dos sintomas patológicos evidentes na sua infraestrutura e superestrutura. Foram constatados: corrosão das armaduras, eflorescência no concreto, desgaste dos aparelhos de apoio, intensa fissuração em forma de "mapa" nos blocos de fundação (tal como mostra a Figura 3), entre outros [16]. Além das características ambientais acima descritas, esses sinais de adoecimento decorreram de descuidos na seleção dos materiais empregados e ineficácia no controle da etapa de construção [21].

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Figura 3: Bloco com fissuração excessiva do tipo “mapa”.



Fonte: Gomes (2008), p. 78.

Acentuado, o aspecto fissuratório observado em boa parte dos blocos sinalizava, de maneira geral, para a manifestação típica da RAA. Fissuras profundas cuja abertura se aproximava dos 5 mm foram descobertas [16]. Diante deste panorama, os especialistas incumbidos da inspeção procederam uma averiguação para comprovar se a causa era efetivamente a reação expansiva. Frisa-se que os demais testes executados não serão descritos, pois fogem do escopo deste artigo.

Para tanto, em uma primeira investigação contratada pela prefeitura, testemunhos foram extraídos e conduzidos à Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), em São Paulo-SP. Entre os ensaios realizados estava a análise petrográfica que, auxiliado pela microscopia eletrônica de varredura, por exemplo, indicou a presença de: material esbranquiçado delimitando a interface agregado-pasta - mais tarde caracterizado como gel expansivo - e fissuras na mesma região e nos agregados. Os resultados acusaram a ocorrência da reação álcali-silicato [16].

Em seguida, uma segunda pesquisa de campo e laboratorial foi implementada. Desta vez, a empresa encarregada enviou os testemunhos ao IPT-SP, que, através de observação petrográfica, concluiu a existência de auréola degenerativa em torno dos agregados graúdos. Estava diagnosticada a RAA, especialmente marcante no perímetro dos blocos. Outros avisos da reatividade foram registrados: diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto, bem como aqueles citados anteriormente [16] [21].

Contribuindo à RAA, os agregados graúdos e miúdos reveleram, nos ensaios, deformação dos feldspatos e do quartzo. Além disso, nos agregados graúdos foram identificados cristais de quartzo com forte extinção ondulante e microgranulados, evidenciando a natureza reativa. Este perfil é notado em hornblenda-biotita monzogranito a granodiorito gnáissico e também em milonito do tipo granítico [16].

Assim, os sintomas em pequena e em grande escalas derivados da interação entre os agregados reativos, os álcalis em quantidade suficiente e a disponibilidade de umidade tornaram-se decisivos na origem do fenômeno. Destaca-se também que as elevadas temperaturas registradas no Recife aceleraram seu progresso.

3.4 Medidas mitigadoras

Inicialmente cogitou-se a demolição e posterior substituição da ponte afetada. Muitas alternativas foram estudadas, inclusive a injeção de sais de lítio. No entanto, concluiu-se que a alternativa mais viável seria o tratamaneto por meio do confinamento dos blocos de concreto. Na impossibilidade de manter o concreto seco, a continuidade das reações era esperada e desse modo a estrutura confinante deveria suportar as tenções expansivas da RAA [21].

De fato, a recuperação dos blocos deu-se por meio do selamento das fissuras externas, do preenchimento das fissuras internas e do confinamento da estrutura afetada [16]. A esturutra da ponte recebeu uma camada de impermeabilizante, a fim de protegê-la da umidade [19].

Inicialmente, executou-se a colmatação das fissuras com epóxi. O objetivo desse primeiro passo foi impedir a entrada de umidade e novos reagentes deletérios. O passo seguinte foi o preenchimento interno das fissuras com microcimento, que teve como objetivo principal a reconstituição da rigidez do bloco, mas também foi responsável pelo combate à infiltração de água por capilaridade [16].

Já o confinamento da estrutura foi obtido pela execução de uma estrutura nova de concreto, envolvendo as quatro faces laterais dos blocos. As duas laterais maiores dessa estrutura foram protendidadas com 3 cabos, cada um com uma ancoragem ativa e uma passiva. Foram utilizados cabos com 12 cordoalhas de 12,5 mm, de aço CP-190RB. Todas as faces foram reforçadas por armadura passiva de aço CA-50 [16]. As tensões de confinamento não impedem a ocorrência da reação, mas exercem resistência às tensões de expansão oriundas da formação do gel [20].

A Figura 4 ilustra as armaduras descritas.

Figura 4: Armaduras da estrutura de confinamento de bloco atingido pela RAA.



Fonte: Gomes (2008), p. 88.

4. Considerações finais

Embora a primeira referência da reação álcali-agregado (RAA) tenha sido há mais de 75 anos, não existe uma medida eficaz que a suspenda totalmente, sendo esta a maior incógnita dos profissionais que trabalham no assunto. Por outro lado, conforme destacado no caso dos blocos de fundação no Recife-PE, está rejeitada a ideia de que a reação pudesse ocorrer apenas em obras de grande porte. Essas duas dimensões, portanto, resumem o quão instigante, específico e múltiplo é o fenômeno, do qual se almeja, baseado no conhecimento tecnológico, alcançar a solução definitiva.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Andriolo, F. R. *Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da reação álcali-agregado.* Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de, 1997, Goiânia. Anais... São Paulo: IBRACON, 1997. 25p.

[2] Hasparyk, N.P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. In: ISAIA, G. C. *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 27. p. 933-1001.

[3] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

[4] Hobbs, D. W. *Alkali Silica reaction in concrete*, 1988. Citado por: Pires, K.P. *Investigação do potencial reativo álcali-agregado residual - um estudo de caso*. 2009. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

[5] Kihara, Y.; Scandiuzzi, L. "*Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros*. *In*: Congresso Brasileiro de Cimento, 3, 1993, São Paulo Anais... v.1. São Paulo: ABCP, 1993. p. 319-338.

[6] Pecchio, M. et al. *Produtos da reação álcali-silicato em concretos de edificações da região Metropolitana do Grande Recife/PE*. In: II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruutras de concreto, 2006. Citado por: Munhoz, F. A. C. *Efeitos de adições ativas na mitigação das reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato*. 2007. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[7] Andrade, T. *Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife*. In: II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruutras de concreto, 2006, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006. 13p.

[8] Andrade, T. "RAA em fundações na Região Metropolitana do Recife: 10 anos de história". *Concreto & Construções*, São Paulo, v. 76, n. 4, p.98-105, out-dez. 2014.

[9] Bertolini, L. *Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 414 p. Tradução de: Leda Beck.

[10] Poole, A. B. *Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete*. In: Swamy, R. N. *The Alkali-Silica reaction in concrete.* Glasgow / London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p. 1-29. Citado por: Munhoz, F. A. C. *Efeitos de adições ativas na mitigação das reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato*. 2007. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[11] Couto, T. A. *Reação Álcali-Agregado: estudo do fenômeno em rochas silicosas*. 2008. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

[12] Cincotto, M. A.; Munhoz, F.A.C. *Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 18 p. (Boletim Técnico).

[13] Neville, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Ed. Pini, 1997. Citado por: Sabbag, A. F. *Verificação da existência de Reação Álcali-Agregado no concreto da UHE de Mascarenhas*. 2003. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

[14] Mizumoto, C.; Salles, F. M. *Efeitos da aplicação de escória granulada de alto forno em diferentes finuras em composições de argamassa*. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió. Anais... São Paulo: IBRACON, 2012. 14p.

[15] Munhoz, F. A. C. *Efeitos de adições ativas na mitigação das reações Álcali-Sílica e Álcali-Silicato*. 2007. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[16] Gomes, E. A. O. *Recuperação estrutural de blocos de fundação afetados pela reação álcali-agregado - a experiência do Recife*. 2008. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

[17] Silva, C. M. *Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado*. 2009. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

[18] Fournier, B.; Bérubé, M. A. "Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, p.167-191, 2000.

[19] Silva, D. J. F. *Estudo dos efeitos do nitrato de lítio na expansão de argamassas sujeitas a reação álcali-sílica*. 2007. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

[20] Andrade, T.; Figuerôa, J. P. *O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto - a descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife*. Recife: Universitária da UFPE, 2007. 228 p.

[21] Helene, P. R. L. *et al*. *AAR in Brazilian bridge foundations - tests and rehabilitation procedures*. In: II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto, 2006, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: IBRACON, 2006. 13p

.