

**FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE ENSINO DE PIRACICABA  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PIRACICABA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BLOCOS  
DE CONCRETO DE FUNDAÇÕES NA CIDADE DO RECIFE-PE**

**IVAN PASSUELO FERRO      RA 201100404**

**PIRACICABA  
NOVEMBRO/2015**

**FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE ENSINO DE PIRACICABA  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PIRACICABA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BLOCOS  
DE CONCRETO DE FUNDAÇÕES NA CIDADE DO RECIFE-PE**

**IVAN PASSUELO FERRO  
RA 201100404**

**MONOGRAFIA ELABORADA POR EXIGÊNCIA DA  
DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE  
CURSO II - TCC II, SOB ORIENTAÇÃO DA PROF<sup>a</sup>  
PATRÍCIA TOLAINE DO AMARAL E SUPERVISÃO  
DO PROF. FRANCISCO CARLOS CASTRO LAHÓZ**

**PIRACICABA  
NOVEMBRO/2015**

**FUNDAÇÃO MUNICIPAL DE ENSINO DE PIRACICABA  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PIRACIACABA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM BLOCOS  
DE CONCRETO DE FUNDAÇÕES NA CIDADE DO RECIFE-PE**

**IVAN PASSUELO FERRO**

Monografia aprovada em **19/11/2015** para obtenção do título de Graduação em Engenharia Civil

Banca Examinadora:

---

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Patrícia Tolaine do Amaral

---

Supervisor: Prof. Francisco Carlos Castro Lahóz

---

Convidado: Eng<sup>º</sup> Douglas de Andreza Couto

*A Nossa Senhora Aparecida, a qual guia o meu caminho*

*Aos meus pais, exemplos de vida*

*Aos meus amigos*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, princípio e fim de tudo, agradeço por fornecer-me propósitos na Sua estupenda obra chamada vida, pela saúde física e emocional, pelo discernimento e permissão para que eu pudesse concluir mais essa fase, e, sobretudo, iluminar-me na escolha da Engenharia Civil;

Aos meus pais José e Helenice, encorajadores assíduos na busca de pautar a minha existência com exemplos de honestidade, respeito, seriedade, atributos que, também herdados a Flávia, minha irmã, guardarei pelos caminhos que o Pai do Céu me reservará. Incentivadores permanentes da minha educação, este espaço, caso não fosse restrito, transbordaria de gratidão a eles. Devo tudo a vocês! *Com profundo amor e carinho;*

À Ana e Amália, pessoas de um senso de altruísmo e bondade incomparáveis. *Agradecimento eterno;*

Aos engenheiros civis José Carlos Rodrigues de Assis e Nelson Kazuo Sato, profissionais que me proporcionaram valiosos conhecimentos. Especial gratidão ao engenheiro civil José Lucas Godói de Almeida, figura de retidão diferenciada e que me ajudou imensamente com suas aulas e explicações sobre o mundo da engenharia, sempre baseadas em lições de profissionalismo e atitudes sensatas;

Aos meus estimados e nobres amigos: Ana Lúcia Gomes Fernandes, Augusto Vidiri, Gabriela Gonçalves Montrazzi, João Vitor Cascone, Lara Giovanetti e Tiago Monegato Siqueira, companheiros para todas as horas, pela amizade sincera, ideias e informações profícuas compartilhadas durante esses anos;

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Patrícia Tolaine do Amaral, pela amizade, orientação, atenção e dedicação à realização deste trabalho;

Ao Prof. Francisco Carlos Castro Lahóz, supervisor desta monografia, pelas dicas e sugestões de grande relevância. Ao Eng<sup>o</sup> Douglas de Andreza Couto (PhD Engenharia), pelos conselhos importantes na execução deste TCC e por aceitar o convite para participar da banca examinadora;

Aos professores Paulo Roberto do Lago Helene (Escola Politécnica da USP) e Tibério Andrade (Universidade Federal de Pernambuco), por gentilmente responderem minhas dúvidas sobre os desdobramentos dos episódios da RAA no Recife;

Ao professor Samuel Tanaami, responsável por indicar-me para a monitoria da disciplina Geometria Analítica e Álgebra Linear I;

Aos professores Milton Rontani Júnior e Renato Soliani, que, sempre atenciosos, não mediram esforços em nos auxiliar em atividades extracurriculares;

Aos demais docentes da Escola de Engenharia de Piracicaba (EEP/FUMEP), pelos ensinamentos e experiências de vida transmitidos e recomendações profissionais passadas ao longo dos 5 anos;

A todos os colegas e amigos de classe fundamentais no decorrer do curso;

Aos membros da APO-CONCREBOL-COCAR-OUSADIA/EEP, equipe na qual integrei durante este ano, trabalhando no desenvolvimento de concreto de alta resistência (CAR) e concreto leve;

Meus sinceros agradecimentos as inúmeras pessoas não citadas neste espaço. Cada colaboração direta ou indireta foi de grande importância no meu crescimento. Isso se aplica a todos aqueles que comigo conviveram por curto ou longo período, desde a tenra idade até o cumprimento de mais esse ciclo.

**Muito Obrigado!**

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

(Madre Teresa de Calcutá)

## RESUMO

Apesar do avanço tecnológico na cadeia produtiva do concreto e do crescente anseio da construção civil em procurar recursos que visam à qualidade contínua das obras, muitas estruturas apresentam, em maior ou menor grau, manifestações patológicas distintas que reduzem a durabilidade e colocam em risco a estabilidade da edificação. No tocante ao conhecimento global dessas anomalias existem, porém, aquelas que merecem destaque face ao poder prejudicial que carregam. Dentre os mecanismos de degradação do concreto nessas circunstâncias distingue-se a reação álcali-agregado (RAA), fascinante e intrincado fenômeno químico responsável por danificar milhares de estruturas no mundo, ainda que estudado desde a década de 1940. Sob prescrições da ABNT NBR 15577:2008, o trabalho aborda conceitos fundamentais da RAA, abrangendo os tipos de reação conhecidos, os agentes condicionantes, bem como os aspectos químicos, os mecanismos de expansão e os fatores intervenientes na velocidade e intensidade do processo deletério. Valendo-se do histórico brasileiro e mundial sobre o tema, a revisão bibliográfica contempla também os sintomas verificados em estruturas afetadas, os métodos de investigação e diagnóstico e as medidas preventivas e mitigadoras da RAA. A fim de entender, na prática, o comportamento, as consequências e as intervenções feitas após a verificação da reação são demonstrados 03 dos surpreendentes casos ocorridos em blocos de concreto de fundações na cidade do Recife-PE, constituindo-se em uma experiência mundial inédita. Conclui-se, a partir de então, que o objetivo da monografia foi atingido.

**Palavras-Chave:** Reação Álcali-Agregado; RAA; Concreto; Mecanismos de Degradação; Estruturas; Recife-PE



## ABSTRACT

Despite the technological advances in the production chain of concrete and the growing desire to find construction resources aimed at continuous quality of the works, many structures present, to a greater or lesser degree, distinct pathological manifestations which reduce the durability and endanger the stability of the building. With regard to global knowledge of these anomalies exist, however, those who are against the harmful power they carry. Among the mechanisms of degradation of concrete under these circumstances is the alkali-aggregate reaction (AAR), fascinating and intricate chemical phenomenon responsible for damaging thousands of structures in the world, although studied since the 1940's. Under requirements of ABNT NBR 15577:2008, the work discusses fundamental concepts of AAR, covering the known reaction types, conditioning agents as well as chemical aspects, the expansion mechanisms and factors involved in the speed and intensity of the deleterious process. Taking advantage of the Brazilian and world history on the subject, the literature review includes also the symptoms recorded in affected structures, methods of research and diagnosis and preventive and mitigating measures of the AAR. In order to understand, in practice, the behavior, the consequences and interventions made after checking the reaction are demonstrated the surprising 03 cases on concrete foundation blocks in the city of Recife-PE, constituting an unprecedented worldwide experience. It appears, then, that the goal of the monograph was hit.

**Keywords:** Alkali-Aggregate Reaction; AAR; Concrete; Mechanisms of Degradation; Structures; Recife-PE

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Topo de pilar de vertedouro de barragem com fissuras típicas da RAA.....   | 4  |
| <b>Figura 2</b> - Fatores essenciais para formar a RAA deletéria.....  | 6  |
| <b>Figura 3</b> - Esquema da quebra das ligações do grupo siloxano devido ao alto pH .....   | 10 |
| <b>Figura 4</b> - Esquema do equilíbrio das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas .....   | 11 |
| <b>Figura 5</b> - Esquema da quebras das ligações do grupo siloxanos pelas hidroxilas .....  | 12 |
| <b>Figura 6</b> - Borda de reação (seta), no encontro do agregado (A) e o material de coloração<br>esbranquiçada (B).....  | 14 |
| <b>Figura 7</b> - Exsudação do gel através de fissura no concreto.....   | 14 |
| <b>Figura 8</b> - Fissura em agregado em obra no Brasil.....   | 23 |
| <b>Figura 9</b> - Exsudação do gel através das fissuras, em obra nos EUA .....   | 24 |
| <b>Figura 10</b> - Junta de contração surgida em razão da RAA, em obra nos EUA .....   | 25 |
| <b>Figura 11</b> - Fissuras do tipo poligonais na superfície, em obra no Brasil .....  | 25 |
| <b>Figura 12</b> – Fotomicrografia de agregado de pedra, onde: 1. Plagioclásio; 2. Quartzo; 3.<br>Biotita; 4. K-Feldspato e 5. Opaco. Imagem ao microscópio ótico com luz polarizada,<br>aumentada em 10x..... | 30 |
| <b>Figura 13</b> – Barras de argamassa utilizadas no ensaio .....  | 31 |
| <b>Figura 14</b> - Moldes e o instrumento de leitura usado no método .....   | 32 |
| <b>Figura 15</b> - Imagens obtidas pela MEV de concreto com RAA. No canto esquerdo superior,<br>nota-se o gel gretado ocupando os poros.....   | 34 |
| <b>Figura 16</b> - Sílica ativa empregada em concreto .....  | 37 |
| <b>Figura 17</b> - Micrografia de cinza volante obtida através do MEV e ampliada em 5000x.....   | 39 |
| <b>Figura 18</b> - Escória granulada de alto-forno.....  | 40 |
| <b>Figura 19</b> - Cinza de casca de arroz .....   | 41 |
| <b>Figura 20</b> - Aplicação de nitrato de lítio em pavimento de concreto afetado pela RAA .....   | 43 |
| <b>Figura 21</b> - Lado direito de muro tratado com pintura à base de siloxano, em Quebec-Canadá<br>.....  | 44 |
| <b>Figura 22</b> - Vista da Ponte Paulo Guerra.....  | 47 |
| <b>Figura 23</b> - Bloco apresentando lixiviação e fissuração em forma de “mapa” .....   | 48 |
| <b>Figura 24</b> – Testemunho extraído apresentando fissura.....   | 48 |
| <b>Figura 25</b> - Detalhe dos cabos de protensão e armadura passiva .....   | 50 |
| <b>Figura 26</b> - Bloco de fundação apresentando fissuras na face superior e lateral.....   | 51 |
| <b>Figura 27</b> - Bloco fissurado lateralmente .....  | 51 |
| <b>Figura 28</b> - Detalhe dos purgadores dispostos ao longo de uma das fissuras.....  | 52 |
| <b>Figura 29</b> - Aspecto geral do reforço com as barras de dywidag .....   | 53 |
| <b>Figura 30</b> - Aspecto da fissuração encontrada em um dos blocos.....  | 54 |
| <b>Figura 31</b> - Detalhe da protensão em um dos blocos .....   | 55 |
| <b>Figura 32</b> - Bloco com a recuperação finalizada .....  | 55 |

**LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1</b> - Agregados e fases mineralógicas de capacidade reativa .....            | 18 |
| <b>Tabela 2</b> - Ocorrência da RAA, em estruturas hidráulicas, em diversas nações ..... | 27 |
| <b>Tabela 3</b> - Casos de RAA em obras hidráulicas brasileiras.....                     | 28 |
| <b>Tabela 4</b> - Ações preventivas em função da categoria de intensidade .....          | 35 |
| <b>Tabela 5</b> - Requisitos dos materiais inibidores da RAA.....                        | 35 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| <b>Gráfico 1</b> - Ação da umidade relativa na expansão do concreto pela RAA .....  | 9  |
| <b>Gráfico 2</b> - Relação entre os álcalis disponíveis, o consumo de cimento e o provável comportamento deletério da reação .....  | 16 |
| <b>Gráfico 3</b> - Expansão verificada em opala empregado como agregado reativo. Nas regiões A e D, ocorre a expansão, sem fissuração; na região B, é verificada a expansão, abundância de álcalis e fissuração; na região C, manifesta-se a expansão, fissuração e excesso de sílica reativa. .... | 19 |
| <b>Gráfico 4</b> - Ação da umidade no desenvolvimento das expansões.....  | 20 |
| <b>Gráfico 5</b> - Ação da temperatura na intensidade das expansões.....  | 21 |
| <b>Gráfico 6</b> - Comparação entre a reatividade potencial de concreto-referência, com metacaulim e com sílica ativa.....  | 38 |

## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>I</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>II</b>  |
| <b>LISTA DE FIGURAS.....</b>   | <b>III</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>LISTA DE GRÁFICOS .....</b>   | <b>V</b>   |
| <b>SUMÁRIO.....</b>  | <b>VI</b>  |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 OBJETIVO .....   | 2          |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DISCUSSÃO .....</b>                           | <b>3</b>   |
| 2.1 A REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO NO CONCRETO.....                              | 3          |
| 2.1.1 Tipos de Reação Álcali-Agregado .....                                | 4          |
| 2.1.1.1 Reação Álcali-Sílica (RAS).....                                    | 4          |
| 2.1.1.2 Reação Álcali-Silicato .....                                       | 5          |
| 2.1.1.3 Reação Álcali-Carbonato (RAC).....                                 | 5          |
| 2.1.2 Fatores Condicionantes do Fenômeno .....                             | 6          |
| 2.1.2.1 Fases Mineralógicas Reativas do Agregado.....                      | 7          |
| 2.1.2.2 Concentração de Hidróxidos Alcalinos .....                         | 7          |
| 2.1.2.3 Umidade .....  | 8          |
| 2.1.3 Aspectos Químicos da Reação Álcali-Sílica.....                       | 10         |
| 2.1.4 Mecanismos de Expansão .....   | 12         |
| 2.1.5 Fatores Influentes na Velocidade e Intensidade da RAA.....           | 15         |
| 2.1.5.1 Teor de Álcalis.....   | 15         |
| 2.1.5.2 Tipos e Teores de Agregados Reativos .....                         | 16         |
| 2.1.5.3 Condições Ambientais e de Exposição.....                           | 19         |
| 2.1.5.4 Características do Concreto .....                                  | 22         |
| 2.1.5.5 Restrições e Tensões Atuantes/Confinantes.....                     | 22         |
| 2.1.6 Principais Sintomas em Estruturas Afetadas pela RAA.....             | 23         |
| 2.1.6.1 Aspectos em Pequena Escala.....                                    | 23         |
| 2.1.6.2 Aspectos em Grande Escala .....                                    | 24         |
| 2.2 HISTÓRICO DA RAA NO MUNDO .....  | 26         |
| 2.3 HISTÓRICO DA RAA NO BRASIL.....  | 27         |
| 2.4 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA RAA.....                                    | 29         |
| 2.4.1 Métodos Laboratoriais para Análise da Reatividade dos Agregados..... | 29         |
| 2.4.1.1 Análise Petrográfica .....   | 29         |
| 2.4.1.2 Método Acelerado em Barras de Argamassa (MABA).....                | 30         |
| 2.4.1.3 Método dos Prismas de Concreto .....                               | 31         |
| 2.4.2 Métodos Auxiliares no Diagnóstico da RAA.....                        | 33         |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 2.5       | MEDIDAS PREVENTIVAS NO COMBATE À RAA .....   | 34        |
| 2.5.1     | Emprego de Adições Minerais na Fabricação do Concreto .....  | 35        |
| 2.5.1.1   | Sílica Ativa .....   | 36        |
| 2.5.1.2   | Metacaulim .....   | 37        |
| 2.5.1.3   | Cinza Volante .....  | 39        |
| 2.5.1.4   | Escória de Alto-Forno .....  | 40        |
| 2.5.1.5   | Cinza de Casca de Arroz .....  | 41        |
| 2.6       | MEDIDAS TERAPÊUTICAS PARA MITIGAR A REAÇÃO.....  | 42        |
| 2.6.1     | Tratamento das Causas.....   | 42        |
| 2.6.2     | Tratamento dos Sintomas.....   | 45        |
| 2.7       | ESTUDOS DE OBRAS: A INÉDITA OCORRÊNCIA DA RAA EM BLOCOS DE<br>CONCRETO DE FUNDAÇÕES NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE..... | 45        |
| 2.7.1     | Ponte Paulo Guerra.....  | 46        |
| 2.7.2     | Edifício Público.....  | 50        |
| 2.7.3     | Edifício Comercial .....   | 53        |
| 2.8       | DISCUSSÃO .....  | 56        |
| <b>3.</b> | <b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>   | <b>59</b> |
| 3.1       | CONCLUSÃO .....  | 59        |
| 3.2       | SUGESTÕES.....   | 60        |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>61</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto atualmente é o material construtivo mais consumido no mundo, sendo facilmente ajustável à capacidade inventiva do homem. Associado ao fato de que os insumos para sua fabricação são encontrados em quase todo o planeta, esse produto oferece vantagens em comparação a outros materiais estruturais, como versatilidade, bom comportamento frente aos esforços aos quais é submetido, baixo preço e adequação ao paradigma de sustentabilidade.

Para se obter um concreto com as características requeridas é fundamental selecionar matérias-primas com qualidade comprovada, bem como desenvolver dosagens criteriosas em face da necessidade de aplicação e da coerência com a resistência mecânica solicitada.

Nos últimas décadas, contudo, orientados pela crescente competitividade mundial na construção civil, os projetistas de estruturas de concreto tiveram de voltar os projetos não somente a resistência à compressão, mas também atender a durabilidade, conceito ligado à manutenção do estado do material à maneira da sua concepção em um determinado tempo.

O estado atual do entendimento da ciência dos materiais e a evolução das técnicas construtivas tornaram-se aliados desse novo panorama, propiciando os profissionais conceberem estruturas com a máxima diligência possível.

Com efeito, por ser constituído de múltiplas variáveis - entre elas a mão-de-obra-, o setor é vulnerável a erros, involuntários ou não, provocados, muitas vezes, pela limitação de conhecimento ou inabilidade do controle de um certo processo.

Diante desse cenário, verifica-se uma tendência nas edificações em apresentarem avarias mesmo após poucos anos de uso. Falhas cometidas em uma ou mais etapas da execução da obra, ou ainda na fase de projeto ou utilização, podem dar origem a manifestações patológicas diversas que, mais tarde, comprometem a durabilidade e reduzem a vida útil.

Dentre os mecanismos de deterioração relacionados ao concreto e citados no item 6.3.2 da ABNT NBR 6118:2014, destacam-se a lixiviação, ataques e expansão por sulfatos e a reação álcali-agregado (RAA).

Em síntese, a RAA é uma reação entre a sílica dos agregados reativos e os hidróxidos alcalinos do cimento, que, na presença de água, origina ou não um gel expansivo capaz de fissurar o elemento estrutural. A julgar pelos aspectos químicos, físicos e

mineralógicos envolvidos, configura-se em um tema com alto nível de complexidade, exigindo visão ampla para melhor compreendê-lo.

Comum em obras hidráulicas, a reação álcali-agregado vem sendo registrada com frequência ao redor do mundo nos últimos 70 anos, constatando-se que, a partir de tais identificações, a comunidade científica tem contribuindo com milhares de trabalhos, cooperando para entender a prática da questão.

No Brasil, essa realidade não é diferente. Desde o primeiro diagnóstico em barragem até a notável confirmação em blocos de fundação, as sucessivas evidências foram suficientes para cuidar de cada caso com naturalidade, embora muitos deles demandem tratamento rigoroso.

No campo das medidas preventivas, as alternativas existentes garantem com sucesso o veto da iniciação do fenômeno. Entretanto, uma vez a reação em curso, enfatiza-se o problema de encontrar soluções remediadoras que minimizem o impacto provocado, prevalecendo, em todas as obras atingidas, a inviabilidade de suspender totalmente o processo deletério.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho consiste em reunir dados bibliográficos que permitam clarificar a compreensão de um dos mais instigantes e desafiadores mecanismos de degradação do concreto, ponderando as soluções preventivas e mitigadoras atualmente disponíveis e, à luz de tal equacionamento, propor sugestões que reduzam o problema apresentado e demonstrar casos sucedidos em blocos de concreto de fundações de edificações na cidade do Recife-PE.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DISCUSSÃO

### 2.1 A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NO CONCRETO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma expressão usada com a finalidade de representar diversos tipos de reações que se desenvolvem no interior do concreto (HASPARYK, 2005).

Em linhas gerais, é a reação entre alguns tipos de minerais reativos contidos nos agregados e os hidróxidos alcalinos oriundos de fonte interna, como o próprio cimento, com a possibilidade de serem provenientes dos constituintes do concreto, como água de amassamento, aditivos, adições minerais e agregados, ou também de fontes externas, como águas marinhas e águas alcalinas industriais (HASPARYK, 2011).

A RAA é comumente verificada em estruturas em contato com a umidade, tais como barragens, fundações e pontes, haja vista a imprescindível presença de água - responsável pela expansão - para o fenômeno vir à tona.

Conforme expõe Valduga (2002) em razão da expansão provocada por esta reação tem-se efeitos usualmente gerados: movimentações de juntas de dilatação/contração e de concretagem, microfissuras e perda de aderência da pasta de cimento junto aos agregados, entre outros.

Segundo Mehta & Monteiro (1994), a expansão e fissuração (cujo exemplo se verifica na Figura 1) em virtude da reação álcali-agregado acarretam em perda de resistência, elasticidade e durabilidade do concreto, comprometendo o desempenho da estrutura.

A RAA foi proposta há mais de 70 anos, sendo descrita inicialmente por Tom Stanton em 1940, na Califórnia, que demonstrou que as fissurações e expansões investigadas em pavimentos de concreto estavam confrontadas a uma reação nociva entre os álcalis do cimento, a sílica do agregado e os componentes do concreto.

Posteriormente à descoberta, diversas pesquisas foram feitas sobre a RAA no Canadá, em algumas nações européias, Índia, China, Japão, porém com maior relevância nos Estados Unidos, que elucidaram boa parte dos fatores envolvidos neste mecanismo de degradação (MUNHOZ, 2007).

**Figura 1** - Topo de pilar de vertedouro de barragem com fissuras típicas da RAA



**Fonte:** <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285390-1.aspx>

### 2.1.1 Tipos de Reação Álcali-Agregado

Em razão do tipo e mineralogia dos agregados reativos envolvidos, a reação álcali-agregado é classificada de três maneiras: reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato (RAC). A literatura recente, no entanto, delimita o fenômeno em RAS e RAC, já que a reação álcali-silicato usualmente é estabelecida como sendo um tipo de reação álcali-sílica (HASPARYK, 2011).

Segundo a mesma autora, as três formas de manifestação da RAA distinguem-se em relação às fases contidas nos agregados e o tempo de evolução da reação, embora os mecanismos e fatores decorrentes sejam, à sua maneira, equivalentes.

O presente trabalho terá enfoque sobre os mecanismos envolvidos nas reações álcali-sílica e álcali-silicato, indistintamente, por se tratarem dos fenômenos mais difundidos na literatura técnica e os mais expressivos no que tange as inúmeras obras afetadas. Assim sendo, doravante o termo RAA se reportará as duas reações referidas.

#### 2.1.1.1 Reação Álcali-Sílica (RAS)

A ABNT NBR 15577-1 (2008, p.2) define a RAS da seguinte maneira:

É um tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença de hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Constituem exemplos de sílica reativa: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros. Este é o tipo de reação álcali-agregado que mais rapidamente se desenvolve.

Em outras palavras, Couto (2008) explica que a reação química entre os hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) das pastas de cimento hidratadas e as determinadas conformações de sílica contidas nos agregados são denominadas reação álcali-sílica (RAS).

Conforme o autor, o primeiro estágio dessa reação se dá através do ataque dos íons hidroxilas existente no meio, passando, subsequentemente, a união dos íons alcalinos - e ocasionalmente os íons de cálcio - à estrutura da sílica. Desse modo, se houver o aporte de umidade ocorrerá a formação de gel expansivo com consequências deletérias aos elementos de concreto.

Dent Glasser e Kataoka (1981) apud Couto (2008) esclarecem que o ataque dos íons hidroxila acontece, sobretudo, na superfície da sílica, em virtude da sua configuração estrutural. Esse processo é considerado demorado, pois poucos íons de Si migram para a fase fluída.

#### 2.1.1.2 Reação Álcali-Silicato

É o tipo de reação álcali-agregado com maior incidência em estruturas danificadas no Brasil (VALDUGA, 2002).

Ainda segundo a mesma autora, as barragens brasileiras acometidas por esta reação foram construídas com agregados oriundos de gnaisses, granitos e quartzitos.

De acordo com Kihara (1986) apud Daher (2009), a reação álcali-silicato pode ocorrer, embora haja uma diversidade de agregados que possivelmente se envolvem na reação, principalmente na presença de quartzo “tensionado” por mecanismos metamórficos ou tectônicos, ou dos minerais do grupo dos filossilicatos (ilitas, vermiculitas e montmorilonitas). De natureza mais lenta, é um tipo específico de RAS, como já explicado.

A ABNT NBR 15577-1 (2008, p.2) descreve a reação álcali-silicato como:

É um tipo específico de reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas. Os silicatos reativos mais comuns são o quartzo tensionado por processos tectônicos e os minerais da classe dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos, entre outros. Geralmente, esta reação é mais lenta do que a descrita na RAS.

#### 2.1.1.3 Reação Álcali-Carbonato (RAC)

Segundo a ABNT NBR 15577-1 (2008, p.2), a reação álcali-carbonato (RAC) é assim definida:

É um tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto é devida à desdolomitização da rocha e consequente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Não há a formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como a brucita, carbonatos alcalinos, carbonato cálcico e silicato magnésiano. Como a reação regenera os hidróxidos alcalinos, a desdolomitização terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote.

Conforme Xu (2000) apud Cardoso (2008), ocorrendo de maneira distinta em relação às outras duas reações, a RAC acontece quando as hidroxilas dos álcalis reagem com agregados carbonáticos em cuja composição se verifica a presença de calcário dolomítico e impurezas argilosas.

Em virtude do restrito conhecimento dos processos envolvidos nesta reação e em detectar agregados reativos do tipo carbonático, diversos estudos nacionais e internacionais têm sido realizados nos últimos anos. Soma-se isso ao fator inibição, o qual não produz o mesmo efeito quanto a RAS, por exemplo.

Em países como China, Canadá e Estados Unidos a RAC foi verificada em dezenas de obras. No entanto, no Brasil não há casos divulgados (HOBBS, 1988 apud CARDOSO, 2008).

### 2.1.2 Fatores Condicionantes do Fenômeno

De maneira ampla, três fatores (representados na Figura 2) são imperiosos que, atuando conjuntamente, podem desencadear a RAA, quais sejam: existência de agregado reativo, elevada concentração de hidróxidos alcalinos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$ ) na solução dos poros do concreto e a presença frequente de umidade satisfatória. Se um dos agentes não estiver presente, a reação não acontece (FOURNIER & BÉRUBÉ, 2000).

**Figura 2** - Fatores essenciais para formar a RAA deletéria



**Fonte:** Couto, 2008, p. 62

Além das condições acima reportadas, Andrade et al. (2006) afirmam que concretos expostos a altas temperaturas tornam a hidratação do cimento mais acelerada, potencializando as reações deletérias.

#### 2.1.2.1 Fases Mineralógicas Reativas do Agregado

Explorar e identificar a mineralogia de rochas e agregados para o concreto conduz a conclusões a respeito do potencial ou não para originar a RAA (HASPARYK, 2011).

A ABNT NBR 15577-1:2008 define agregado reativo como aquele que, reagindo com a solução alcalina presente nos poros do concreto ou advindo de fontes externas, causa o aparecimento de manifestações patológicas provenientes da RAA.

A mesma norma também faz alusão aos termos agregado potencialmente reativo e potencialmente inócuo. Todavia, segundo Dal Molin, Paulon & Valduga (2006), embora exista a percepção desse conhecimento, a questão de um método seguro para agrupar os agregados como inócuos ou reativos ainda provoca debates.

Para Mehta & Monteiro (1994), todos os silicatos ou minerais de sílica, do mesmo modo a sílica amorfa (obsidiana, vidro de sílica) ou a sílica hidratada (opala) têm condições de reagir com os álcalis. Entretanto, boa parcela dos minerais reage em intensidade irrelevante.

De maneira geral, a reatividade é alta para estruturas amorfas e considerada baixa para as estruturas cristalinas da sílica (quartzo, por exemplo). Entende-se, portanto, que a reatividade dos minerais da sílica exerce papel significativo na reação (BERTOLINI, 2010).

Ainda sob as considerações de Bertolini (2010), o teor de sílica reativa possui notório efeito na agressividade do ataque e sua concentração reduzida, em certos teores, em expansão máxima. Para a sílica amorfa, esse teor está entre 2% e 10%, ao passo que, para sílicas com menores índices de reação, este valor é cerca de 30%.

#### 2.1.2.2 Concentração de Hidróxidos Alcalinos

Derivados de sódio e de potássio, a principal fonte de álcalis envolvidos no processo químico da reação álcali-agregado é o cimento. Então, o seu teor é quantificado em virtude do teor de óxido de sódio ou potássio. Costumeiramente é expresso como teor de óxido de sódio equivalente, representado pela equação abaixo:

$$\%Na_2O_{eq} = \%Na_2O + 0,659.\%K_2O \quad (\text{Equação 1})$$

Os álcalis podem vir também de fontes internas ao concreto, como agregados, aditivos, água de amassamento e adições minerais (HASPARYK, 2011). Em relação a este último componente, porém, Glasser (1992) apud Couto (2008) menciona que a velocidade de hidratação, o teor adicionado e a forma de ocorrência são fatores influentes na disponibilidade de álcalis.

Os autores Mehta & Monteiro (1994) afirmam que a limitação do conteúdo de álcalis no cimento em 0,60 % representa a inibição da deterioração por obra da RAA.

No entanto, a fixação de 0,60%, em uma citação ao cimento com baixo teor de álcalis, não é garantia do impedimento de expansões mínimas, nem condição exclusivamente eficiente no sentido de evitar danos ao concreto (STANTON, 1940 apud HASPARYK, 2011).

De acordo com Fournier & Bérubé (2000), o teor de álcalis total essencial para provocar e sustentar a RAA nociva não possui um limite, diferenciando de um agregado para outro.

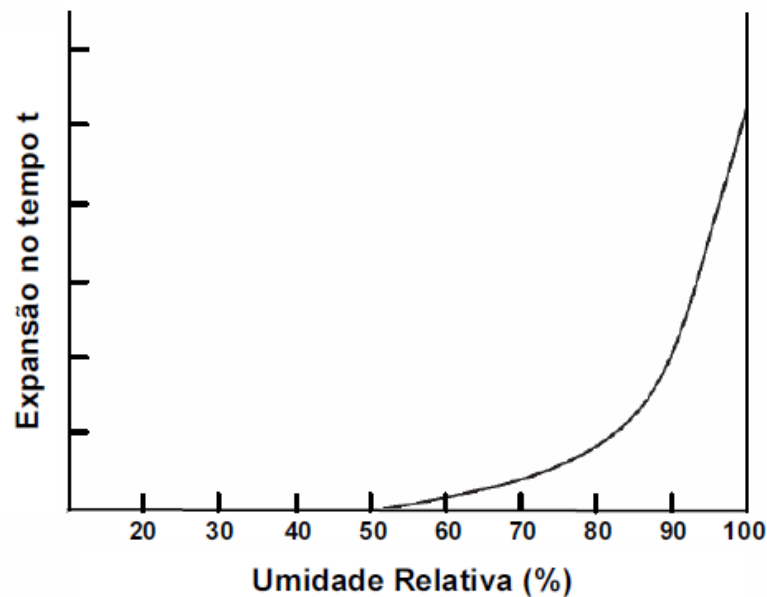
### 2.1.2.3 Umidade

Sabe-se que a porosidade do concreto é diretamente ligada à estanqueidade das estruturas para impedir o acesso de líquidos. Tal propriedade também está vinculada a continuidade, volume, distribuição e dimensões dos poros (NEVILLE, 1982).

Por outro lado, com a redução da relação água/cimento há um beneficiamento da porosidade do concreto, tornando mais lento o processo de entrada de agentes agressivos e a movimentação da umidade interna no seu interior (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Poole (1992) apud Munhoz (2007) destaca que a água exerce duas aplicabilidades na RAA. Em primeiro lugar, é imprescindível para realizar o transporte dos cátions alcalinos e íons hidroxilas. Em seguida, o produto da reação, designado gel de silicato alcalino, absorve enorme quantidade de água e expande, formando, com o passar do tempo, fissuras devidas à pressão hidráulica na pasta de cimento.

**Gráfico 1** - Ação da umidade relativa na expansão do concreto pela RAA



Fonte: Poole, 1992 apud Munhoz, 2007, p. 51

A respeito da importância da água para o desdobramento da RAA, Rodrigues (2014) atesta que ela participa de modo decisivo, porque é atuante na reação do cimento, e este tem a finalidade de liberar os álcalis.

Segundo Hasparyk (2005), a umidade relativa externa superior a 80% incorre em relevantes acréscimos na reação (o Gráfico 1 ilustra esse crescimento). Na mesma linha de raciocínio, mas com vistas à umidade interna do concreto, o documento BCA (1992) apud Fournier & Bérubé (2000) menciona que tal teor deve estar compreendido acima de 80% a 85% para assegurar a RAA.

Concretos submetidos a ciclos de molhagem e secagem tornam-se mais susceptíveis a ampliação das reações expansivas, pois a umidade pode ocasionar a solubilização e migração de álcalis para determinadas áreas do concreto (KIHARA, 1986 apud COUTO, 2008).

De acordo com Bertolini (2010), em ambientes com umidade relativa abaixo de 80%-90%, a interação entre os álcalis e os agregados reativos não suscita nenhuma lesão ao concreto.

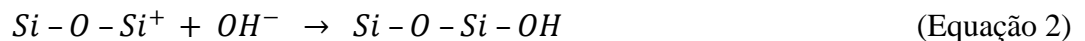
### 2.1.3 Aspectos Químicos da Reação Álcali-Sílica

Vários autores dividem a mesma opinião acerca do princípio químico que governa a RAS, sendo retratado em duas etapas fundamentais. Nas condições iniciais os íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), decisivos no estabelecimento da alta alcalinidade da solução dos poros do concreto, reagem com a superfície da sílica reativa existente no agregado graúdo ou miúdo, o que origina ligações do grupo silanol ( $\text{Si} - \text{OH}$ ), indicadas pela Equação 2 e Figura 3 (COUTO, 2008).

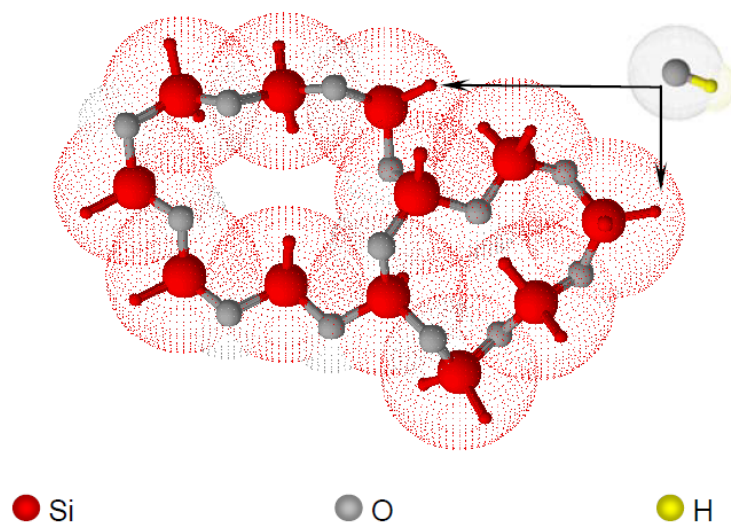
A partir de então, Hasparyk (2011) afirma que ocorre o surgimento da conexão e atração dos cátions de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) que estão contidos no meio, constituindo o equilíbrio das cargas negativas e produzindo um gel sílico-alcalino da reação álcali-sílica.

Após a associação dos cátions, o grupo siloxano ( $= \text{Si} - \text{O} - \text{Si} =$ ) sofre quebra de suas ligações em outro estágio da reação (HASPARYK, 2011).

A maior ou menor severidade da reação será derivada do grau de cristalinidade da sílica. Assim, na situação de boa cristalinidade, o desencadeamento das reações acontece superficialmente, enquanto que sílicas menos cristalinas propiciam reações mais profundas (DENT GLASSER & KATAOKA, 1981 apud HASPARYK, 2011).



**Figura 3** - Esquema da quebra das ligações do grupo siloxano devido ao alto pH



**Fonte:** Couto, 2008, p. 55

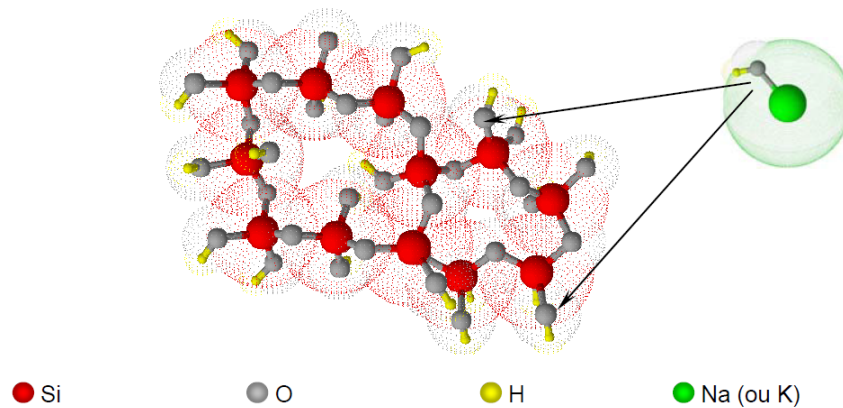
De acordo com Couto (2008), os dois estágios da reação podem ser resumidos do seguinte modo:



- Estágio 1: ataque dos íons hidroxilas ao grupo silanol manifesto na superfície da sílica. Verifica-se, pois, que a solução dos poros do concreto, alcalina por natureza, e a sílica, de caráter ácido, formam uma reação ácido-base. O desfecho do primeiro estágio ocorre quando do equilíbrio das cargas negativas e da geração do gel, conforme as Equações 3 e 4 e a Figura 4.

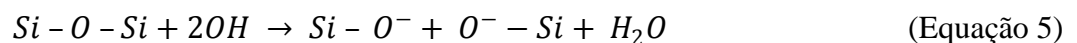


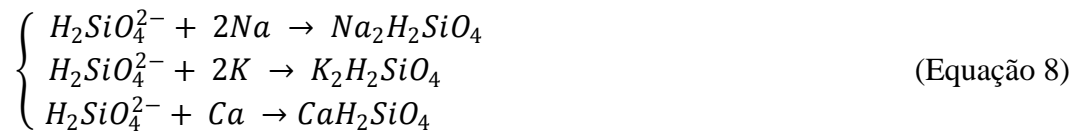
**Figura 4** - Esquema do equilíbrio das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas



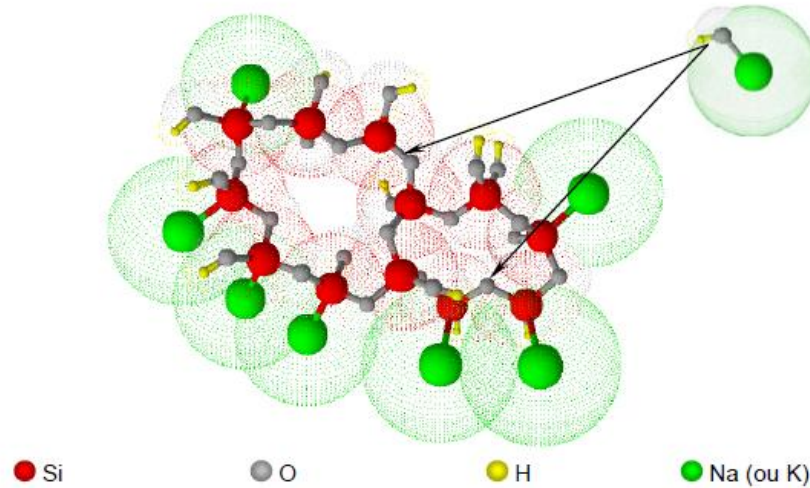
Fonte: Couto, 2008, p. 56

- Estágio 2: dissociação da estrutura da sílica e posterior adsorção da água e dos íons alcalinos. A farta presença de íons hidroxilas devido à sua retomada a cada reação promove o ataque às ligações mais arraigadas da sílica, isto é, o grupo denominado siloxano. As Equações 5 a 8 e a Figura 5 ilustram esse mecanismo.





**Figura 5** - Esquema da quebras das ligações do grupo siloxanos pelas hidroxilas



Fonte: Couto, 2008, p. 57

#### 2.1.4 Mecanismos de Expansão

O gel sílico-alcálico, formado em decorrência das reações químicas explicadas no tópico anterior, é constituído por um material viscoso, formado basicamente de sílica, álcalis, cálcio e água. Sua coloração é esbranquiçada (ANDRADE & FIGUERÔA, 2007).

Sendo essencialmente higroscópico, ou seja, tem potencializado a tendência de impregnar-se de água, o gel absorve-a por osmose e torna-se um material de natureza expansiva (ANDRADE & FIGUERÔA, 2007).

Conforme esclarece Valduga (2002), a quantidade de cálcio presente no gel é fator decisivo para classificá-lo quanto à sua expansividade frente ao contato com a água. Por isso, essa teoria diz que se o gel contiver elevado teor de cálcio, menor será sua expansão e, assim, não incide no aparecimento de fissuras no concreto.

Os pesquisadores Prezzi, Monteiro & Sposito (1997) apontam a variação existente entre os distintos tipos de géis formados em razão dos diferentes produtos da reação imposta. Para eles, as propriedades expansivas dos géis são dependentes de alguns fatores, tais como:

- Estrutura interna do gel produzido, isto é, a expansão/retração sofrerá influência, quando expostos a ciclos de secagem/molhagem, pelo tamanho e distribuição dos poros do gel;
- Forma e tamanho das partículas do agregado;
- Composição do gel;
- Concentração e tipo dos íons nos fluidos dos poros.

Os fundamentos mais propagados a respeito dos mecanismos de expansão do gel são de autoria de Hansen, em 1940; Vivian, em 1952; e Prezzi, Monteiro & Sposito, em 1997 (BATISTA, 2013).

Segundo Hasparyk (2011), a hipótese proposta por Hansen, intitulada teoria da pressão osmótica, confere a expansão da RAA às pressões hidráulicas motivadas pelos produtos da reação. Entretanto, a teoria mais considerada pelo fato da capacidade de adsorção do produto gerado culminar nas tensões impostas por meio da expansão do gel é a reproduzida por Vivian.

Nos dias atuais, o modelo proposto por Prezzi, Monteiro & Sposito, baseado no conceito de química da superfície, é bastante aceito no meio técnico, e explica com maior lucidez as expansões advindas da reação álcali-agregado (BATISTA, 2013).

Segundo esse último modelo, as expansões acarretadas pelo aumento de volume do gel são de responsabilidade das forças de repulsão da dupla camada elétrica. Desse modo, a fase sólida, ao se envolver com uma fase líquida, adquire abundância de cargas e provoca, na sua interface, o surgimento de carga elétrica através da adsorção de íons (HASPARYK, 2011; BATISTA, 2013).

Conforme Prezzi, Monteiro & Sposito (1997), ao preservar os demais fatores do fenômeno, tem-se que um gel repleto de sódio apresenta maior capacidade de expansão ante a um gel rico em cálcio. Isso ocorre porque íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  fornecem espessuras superiores na dupla camada por conta da propensão à dispersão no complexo da adsorção. Com isso, são concebidas maiores forças de repulsão do que os íons  $\text{Ca}^{2+}$ .

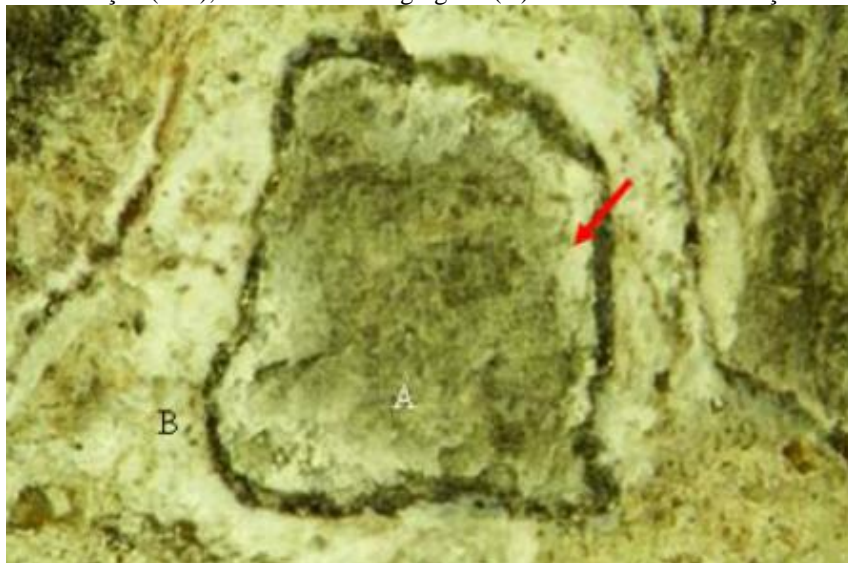
Em síntese, a reação se desdobra mediante a neutralização da carga negativa - manifesta na solução alcalina dos poros do concreto - pela superfície da sílica, envolta em uma dupla camada de cátions (íons cálcio, potássio e sódio). O produto resultante de tal reação é o gel, que, além de dissolver a sílica e sendo sustentado pela umidade, fomenta a expansão (HASPARYK, 1999 apud CARDOSO, 2008).

Assim, com o desenvolvimento da expansão do gel em contato com a água, resultam-se tensões internas e microfissurações, as quais acompanham o avanço das reações e

ocasionam um sistema de fissuras que pode se alastrar no concreto, modificando a sua rede de poros e facilitando a penetração de umidade (PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO, 1997).

De acordo com Glasser (1992) apud Hasparyk (2011) é laborioso determinar a extensão das expansões. Além disso, o gel formado não é muito solúvel e comumente se acumula ao redor dos agregados (Figura 6). Às vezes, contudo, surge um gel de caráter mais fluido cuja tendência é exsudar-se na superfície do concreto durante a etapa de inchamento, conforme expresso na Figura 7.

**Figura 6** - Borda de reação (seta), no encontro do agregado (A) e o material de coloração esbranquiçada (B)



Fonte: Silva, 2007, p. 67

**Figura 7** - Exsudação do gel através de fissura no concreto



Fonte: Dal Molin, Hasparyk & Monteiro, 2006, p. 02

### 2.1.5 Fatores Influentes na Velocidade e Intensidade da RAA

Existem diversos fatores que contribuem para o avanço da velocidade e intensidade da RAA, transformando principalmente os mecanismos da reação no seu modo de atuação e na expansão do produto gerado.

Sob essa ótica, dependendo do parâmetro interveniente e das condições do meio, verifica-se, em maior ou menor grau, a rapidez e lentidão da reação, ou ainda o progresso mais ou menos acentuado dos prejuízos proporcionados devido ao desencadeamento da RAA.

A interação conjunta de tais elementos pode trazer sérios danos patológicos e também acentuar progressivamente as reações envolvidas, favorecendo o adoecimento da estrutura de concreto.

Ressalta-se que em função dos fatores é arriscado admitir um período no qual a RAA se estabelece e seja objeto de constatação. No entanto, conforme afirma Poole (1992) apud Hasparyk (2011), alguns estudiosos do tema definem o tempo de 5 a 12 anos para a reação vir à tona, salvo poucas exceções.

#### 2.1.5.1 Teor de Álcalis

A principal procedência de álcalis é o cimento, em concordância com o já descrito. Entretanto, outros componentes do concreto (agregados, água, aditivos e adições) são capazes de expelir os íons de sódio e potássio na solução dos poros, apesar de colaborarem em pequenos teores (BERTOLINI, 2010).

Segundo Kihara & Scandiuzzi (1993), o uso de cimento com baixa quantidade de álcalis no sentido de conter a RAA é uma medida que não produz efeitos convincentes, pois em alguns casos a introdução de álcalis suplementar ultrapassa as expansões verificadas somente com tais íons do próprio cimento.

A visão difundida de que o limite máximo de 0,6 % - para o equivalente em sódio - seria o bastante para impedir a RAA foi descartada por inúmeros estudos, os quais comprovaram a incidência de manifestações patológicas devido à RAS mesmo com percentuais mais reduzidos (ANDRADE & FIGUERÔA, 2007).

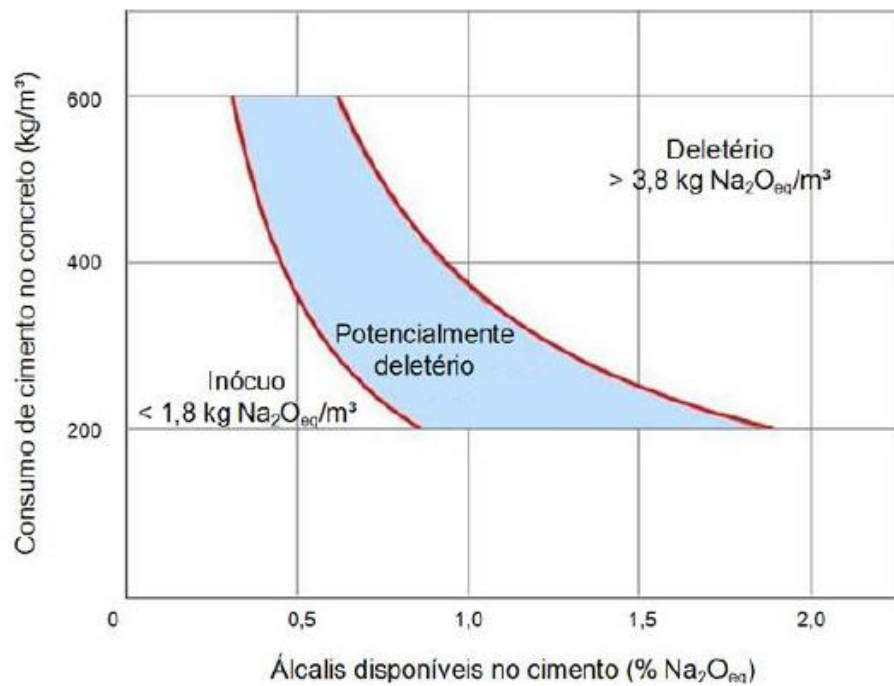
Atualmente não se tem estabelecido um denominador comum de qual teor máximo de álcalis, em kg/m<sup>3</sup>, deva ser admitido para dificultar a ocorrência das reações nocivas. Alguns estudiosos do tema, porém, determinaram valores de aplicação em vários países (SANCHEZ, 2008).

Conforme as considerações de Bérubé (2000) apud Sanchez (2008), restringir a 3 kg/m<sup>3</sup> o teor de álcalis no concreto é tratado como uma saída válida na tentativa de minorar a RAA. Para tanto, o autor propõe que para isso deve-se empregar cimento com reduzido teor de álcalis, trocar parte do cimento por adições minerais ou químicas e diminuir o consumo de cimento no concreto.

De acordo com Andrade & Figuerôa (2007), os pesquisadores Ozol, em 1990, e Ozol e Dusenberry, em 1992, verificaram a RAS mesmo com o conteúdo de álcalis estando em 1,8 kg/m<sup>3</sup> e 2,3 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

A seguir, apresenta-se, no Gráfico 2, a classificação do comportamento da reação em razão dos álcalis disponíveis e do consumo de cimento no concreto, proposta por Oberholster, Van Aardt e Brandt, em 1983, conforme esclarece Couto (2008). No entanto, nos dias atuais essas correlações não são totalmente verdadeiras.

**Gráfico 2** - Relação entre os álcalis disponíveis, o consumo de cimento e o provável comportamento deletério da reação



Fonte: Couto, 2008, p. 63

#### 2.1.5.2 Tipos e Teores de Agregados Reativos

Segundo Kihara & Scanduzzi (1993), dá-se o nome a agregados reativos aqueles que contêm, em determinados teores, fases mineralógicas que reagem quimicamente com os álcalis do cimento produzindo interações destrutivas que danificam o concreto.

Por assim dizer, percebe-se que agregados com maior capacidade de reatividade promovem deterioração de superior monta em estruturas de concreto (SANCHEZ, 2008).

Os fatores interferentes na reatividade dos álcalis com os componentes silicosos, de acordo com KIHARA & SCANDIUZZI (1993), são:

- Estrutura cristalina: a reação deletéria é favorecida, ou seja, a fase será mais reativa quanto maior for a desorganização e instabilidade da estrutura cristalina. Assim, a reatividade do quartzo, estruturalmente bem definida, é inferior a do vidro, opala, calcedônia, tridimita, cristobalita e quartzo tensionado, minerais que não possuem a mesma cristalinidade;
- Granulação: a reatividade será potencializada quanto mais finos os agregados contiverem, pois aumenta sua superfície da reação;
- Teor de água de cristalização: o que equivale ao conteúdo de silanóis (grupos de SiOH), que concede maior reatividade às fases.

A parte 3 da ABNT NBR 15577:2008 faz alusão aos limites e às fases temerárias, o que discrimina os agregados em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Abaixo, transcreve-se o que norma diz a respeito (HASPARYK, 2011):

Os limites máximos aceitáveis de fases reativas geralmente adotados para classificar um agregado como potencialmente inócuo são: 5% (quartzo deletério), 3% (calcedônia), 1% (tridimita ou cristobalita), 3% (vidro vulcânico) e 0,5% (opala). Entretanto, com base em sua experiência e nas feições presentes, o petrógrafo pode admitir limites distintos.

A referida norma elenca os agregados e minerais que eventualmente podem colaborar na RAA, permitindo separá-los em dois grupos descritos abaixo, conforme relatado em HASPARYK (2011):

Primeiro conjunto - minerais que possuem sílica metaestável: tridimita (polimorfo de SiO<sub>2</sub>), cristobalita (polimorfo de SiO<sub>2</sub>) e vidros vulcânicos ácidos, intermediários e básicos. Englobam-se também os minerais de pouca cristalinidade, caso da opala (mineraloide, mais conhecida com sílica hidratada amorfa ou coloidal).

Em relação ao primeiro conjunto, as rochas sedimentares e vulcânicas mais propensas à RAA, já que possuem alguns desses minerais citados, são: folhelhos, arenitos, cherts, flints, rochas silicificadas e diatomitos (natureza sedimentar); riolitos, latitos, dacitos, andesitos, tufos, perlitas, obdisianas, espécies de rochas com matriz vítrea e certos basaltos (natureza vulcânica).

Segundo conjunto - encontram-se os quartzos, como a calcedônia (espécie micro e criptocristalina de quartzo da classe fibrosa) e o quartzo macrogranular, com o retículo



cristalino deformado, fraturado e com incorporação de quartzo microcristalino. Os vidros devitrificados micro ou criptocristalino também compõem este conjunto.

Entre as rochas abrangidas no segundo conjunto, tem-se: rochas ígneas, como granito, granodiorito e charnoquito; rochas sedimentares, como arenito, siltito, argilito, grauvaca, calcário silicoso, folhelho e arcóseo; bem como as rochas metamórficas, tais como quartzito, gnaisse, quartzo-micaxisto, milonito, filito, ardósia e granulito.

A Tabela 1 mostra, resumidamente, as fases potencialmente reativas de cada tipo de agregado, a partir da respectiva natureza da rocha.

**Tabela 1** - Agregados e fases mineralógicas de capacidade reativa

| Tipo de agregado   | Fase mineralógica potencialmente reativa  |
|--|---|
| Rocha Ígnea<br>Andesito, dacito, fonólito, latito, obsidiana, pedra púmice, riolito, traquito e tufo vulcânico | ➤ vidro vulcânico ácido a intermediário, tridimita e minerais de alteração (vidro devitrificado)  |
|  | Basalto <sup>(*)</sup><br>➤ vidro vulcânico básico<br>➤ calcedônia, cristobalita e opala<br>➤ minerais de alteração (clorofeita)                                |
|  |   |
| Rocha Sedimentar<br>Arenito<br>Calcário<br>Chert<br>Grauvaca   | ➤ >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante >25°<br>➤ opala e calcedônia   |
|  | ➤ relação calcita/dolomita próxima a 1 e quando associado a argilominerais (filossilicatos)<br>➤ opala, calcedônia  |
|  | ➤ opala e calcedônia<br>➤ sílica criptocristalina   |
|  | ➤ 30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante >25° e quartzo microcristalino a criptocristalino<br>➤ argilominerais (filossilicatos)<br>➤ opala |
| Rocha Metamórfica<br>Ardósia<br>Filito<br>Hornfel<br>Gnaisse, granulito, micaxisto, quartzito e xisto          | ➤ quartzo tensionado<br>➤ argilominerais (filossilicatos)   |
|  | ➤ >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante >25° e quartzo microcristalino a criptocristalino<br>➤ vermiculita (filossilicatos)              |
|  | ➤ >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante >25° e quartzo microcristalino a criptocristalino<br>➤ vermiculita (filossilicatos)              |
|  | ➤ >30% de quartzo tensionado, com ângulo de extinção ondulante >25°, feldspato deformado e quartzo de granulação fina   |
| Milonito <sup>(*)</sup>  | ➤ quartzo tensionado e de granulação fina   |

Fonte: Munhoz, 2007, p. 37

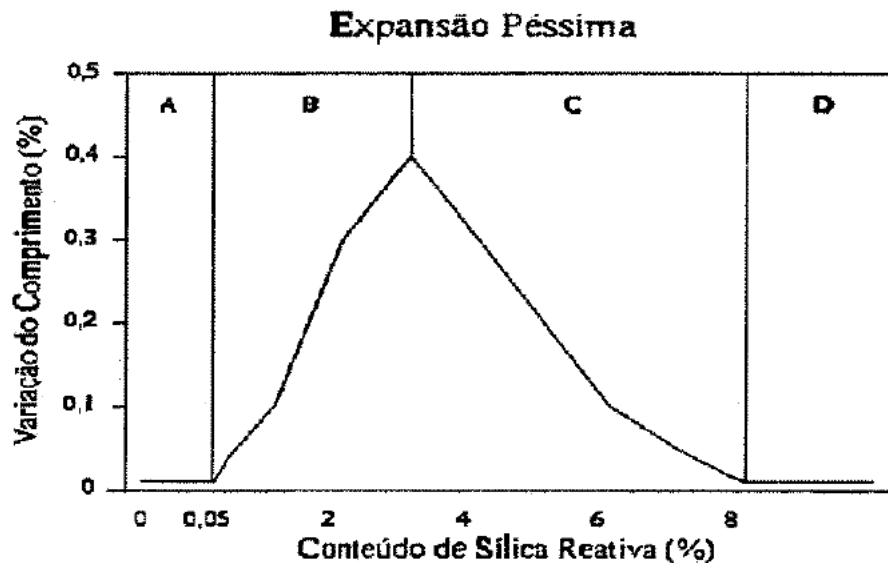


De acordo com Dechichi (1998), incontestavelmente menores porções de minerais reativos no agregado impelem a redução de álcalis participantes da reação, possibilitando-os que permaneçam e sejam suficientes para a produção do gel expansivo. Em outras palavras, decresce a chance de expansões no futuro, porque os álcalis são esgotados imediatamente.

Há uma proporção de constituintes reativos contidos no agregado que induz a uma extrema expansão, sendo tal quantidade vinculada ao pico de dilatação do concreto, conceito esse denominado de “proporção péssima” (HOBBS, 1988 apud DECHICHI, 1998).

O Gráfico 3 apresenta a expansão de uma opala, estudada na seguinte conjuntura que levou à proporção péssima: relação a/c = 0,4, relação agregado/cimento = 0,75 e teor de álcalis = 6 kg/m<sup>3</sup>.

**Gráfico 3** - Expansão verificada em opala empregada como agregado reativo. Nas regiões A e D, ocorre a expansão, sem fissuração; na região B, é verificada a expansão, abundância de álcalis e fissuração; na região C, manifestam-se a expansão, fissuração e excesso de sílica reativa.



Fonte: Hobbs (1988) apud Dechichi, 1998, p. 29

### 2.1.5.3 Condições Ambientais e de Exposição

As variações das condições de temperatura e umidade nas quais o concreto é submetido têm importante predomínio no comportamento, velocidade e intensidade da reação álcali-agregado.

Como visto anteriormente, a umidade é um dos fatores condicionantes do fenômeno da RAA. Sabe-se, também, que o aporte de água pode vir internamente ao

concreto, durante o processo de amassamento, ou externamente, dependendo da proximidade da estrutura em relação à umidade.

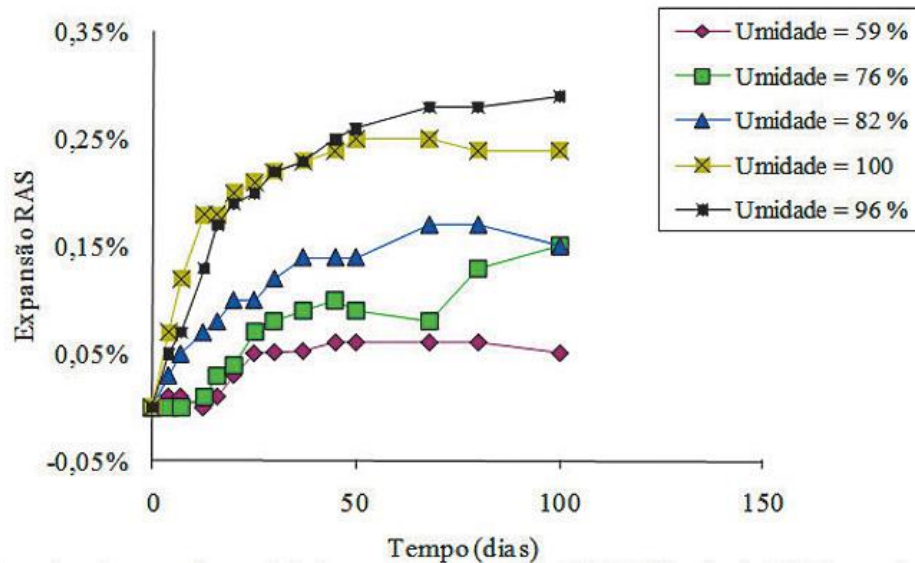
Uma vez o elemento de concreto exposto à umidade permanente ou por ciclos, os íons ali presentes acabam se solubilizando e migrando mais rapidamente na solução dos poros (KIHARA & SCANDIUZZI, 1993).

No que tange à umidade interna, a ABNT NBR 15577-1 afirma taxativamente:

A reação álcali-agregado pode ocorrer em elementos de estruturas maciças, em ambientes secos, uma vez que o concreto pode possuir internamente umidade relativa suficiente para o desenvolvimento da reação.

Segundo Hasparyk (2011), a umidade interna essencial para desencadear e manter a RAA está entre 80% a 85%. De maneira contrária, porém, Fournier & Bérubé (2000) certificam que se o concreto possuir o gel da RAA e estiver carbonatado, mesmo em contato com a água adicional é provável que não aconteça a expansão.

**Gráfico 4** - Ação da umidade externa no desenvolvimento das expansões



Fonte: CD-ROM - Concreto: ciência e tecnologia- ISAIA, G.C. 1ªed. IBRACON, São Paulo, 2011.

Relativamente à umidade advinda de fontes externas, é sabido que há uma ampliação na grandeza da reação quando o ambiente propicia U.R. acima de 80%, como se verifica no Gráfico 4.

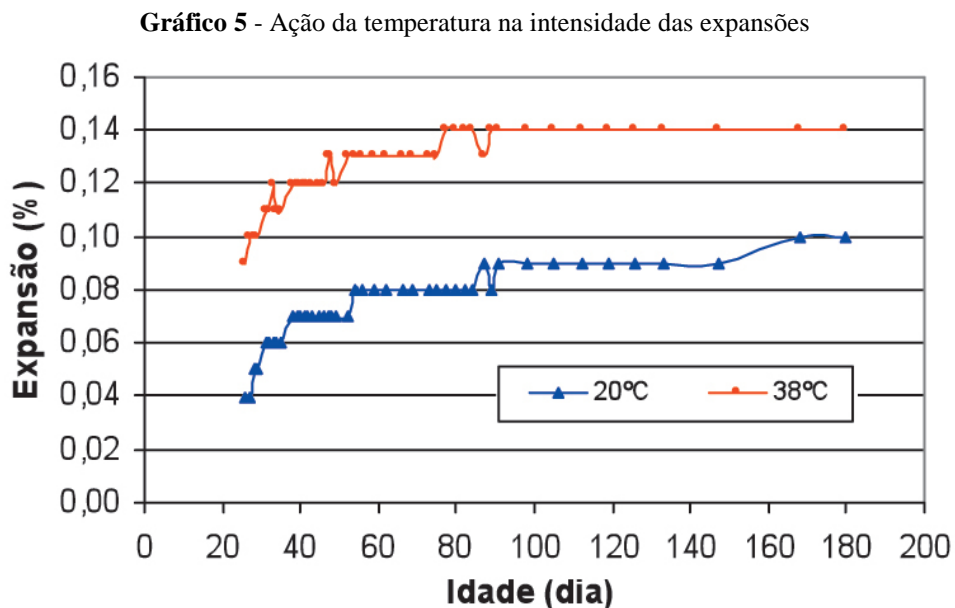
Outro fator interveniente na natureza da reação é a temperatura. De acordo com Kihara & ScandiuZZi (1993), sabe-se que altas temperaturas proporcionam incremento da hidratação do cimento e da potencialização da agressividade das soluções alcalinas.

Ademais, a temperatura exerce sua função na cinética da reação, estimulando-a. Ao atingir certo limite, ocorre alteração das reações e estas perdem sua força (RODRIGUES, 2014).

Exemplificando, a velocidade da RAA é maior no verão em nações nórdicas, pois naqueles países existem consideráveis gradientes térmicos. Em regiões de clima majoritariamente frio, a exemplo da França, as expansões devido à RAA encontram-se em menores proporções (RODRIGUES, 2014).

Em relação ao tempo de exposição da estrutura de concreto, quanto maior o período de exposição a certas situações favoráveis à propagação da reação, mais avolumadas serão as expansões. No entanto, se um ou mais agentes do fenômeno forem extintos, tem-se aí a interrupção do processo (HASPARYK, 2011).

O Gráfico 5 retrata a influência da temperatura nas expansões.



Fonte: CD-ROM - Concreto: ciência e tecnologia- ISAIA, G.C. 1ªed. IBRACON, São Paulo, 2011.

Em sua tese de doutoramento, Hasparyk (2005) estudou diversos testemunhos de concreto retirados da UHE Furnas e afetados pela RAA, os quais foram acompanhados, sob prescrições laboratoriais, durante 1 ano. Ela observou que, em ambientes com alta umidade, existe uma tendência de neutralização das expansões à temperatura de 38°C. O mesmo estudo corroborou a hipótese da continuidade das expansões por tempo indefinido, sempre que mantido os 3 agentes condicionantes.

#### 2.1.5.4 Características do Concreto

De acordo com Fournier & Bérubé (2000), um concreto feito com relação água/cimento mais baixa o torna melhor do ponto de vista das propriedades mecânicas, reduz a porosidade, diminui o conteúdo de água interna livre e minora a possibilidade do ingresso de água externa e da percolação interna.

Em seus estudos, os pesquisadores mencionados chegaram à conclusão que a expansão devido à RAA é frequentemente reduzida ao variar a relação a/c de 0,55 a 0,35.

Da mesma reflexão compartilha Carrazedo (2004) apud Silva (2007), e ainda complementa que um concreto com baixa porosidade pode bloquear tanto a formação quanto a expansão do gel. Em se tratando de concreto com elevada porosidade, o gel, ao expandir, teria certa liberdade e não sujeitaria o concreto às pressões internas encarregadas pela sua fissuração e dilatação.

Além de terem maior espaço para a expansão do gel, concretos mais porosos tendem a reservar maiores quantidades de água intersticial, elemento vital para a RAA. Contudo, não se pode assegurar qual das circunstâncias é a mais preponderante (SILVEIRA, 1997 apud RODRIGUES, 2014).

Conforme relata Hasparyk (2011), é visível a deposição dos produtos formados pela RAA nos poros do concreto, mas os efeitos deletérios são de intensidade baixa por conta dessa alta porosidade. Em alguns casos, exige-se tempo para perceber as sequelas no elemento.

#### 2.1.5.5 Restrições e Tensões Atuantes/Confinantes

As restrições são associadas à presença de armadura cuja ingerência pode levar ao decréscimo das expansões e permitir a mudança da configuração das fissuras. Isso significa que em concreto armado as fissuras se apresentam paralelas à armadura, e em casos de concreto sem armação, as fissuras são mapeadas (HOBBS, 1988 apud HASPARYK, 2011).

Conforme Carrazedo (2004) apud Silva (2007), as tensões confinantes possuem o aspecto de restringir a expansão do concreto, chegando até o caso de anulá-la. Assim, uma carga de tração ajuda a expansão na direção da aplicação, enquanto que uma carga de compressão refreia o aumento de volume na mesma direção de carregamento.

A RAA pode ser um dos fatores responsáveis pela formação da etringita tardia (DEF), o que acarreta em maiores expansões no concreto. Todavia, essa associação não será objeto de maiores detalhes no presente trabalho.

## 2.1.6 Principais Sintomas em Estruturas Afetadas pela RAA

De acordo com Andriolo (1997), os principais sintomas apresentados pela RAA podem ser distinguidos em aspectos em pequena escala e em grande escala, mostrados a seguir.

### 2.1.6.1 Aspectos em Pequena Escala

- Fissuras nas imediações e na própria superfície dos agregados (Figura 8);
- Microfissuras no concreto, tal qual na argamassa que ocupa os vazios entre os agregados;
- Perda de aderência (descolamento) da argamassa envolta a superfície dos agregados;
- Ocorrência de bordas de reação em torno dos agregados participantes da reação com os álcalis e gel gretado ocupando os poros do concreto;
- Existência de gel exsudando ou ocupando vazios no concreto (Figura 9).

**Figura 8** - Fissura em agregado em obra no Brasil



Fonte: Andriolo, 1997, p. 06

**Figura 9** - Exsudação do gel através das fissuras, em obra nos EUA



**Fonte:** Andriolo, 1997, p. 13

#### 2.1.6.2 Aspectos em Grande Escala

São comumente notados, em usinas hidrelétricas, os seguintes indícios patológicos:

- Movimentação de juntas de contração, ou seja, abertura e/ou deslocamento relativo, passíveis de confusão com movimentos oriundos por recalques de fundação (Figura 10);
- Presença de gel exsudando através das fissuras do concreto;
- Deslocamento e/ou travamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, pistões, eixos, entre outros);
- Fissuração nas extremidades com perfil de esfoliamento; em certas localidades, onde o clima é austero, é natural ser confundida com fissuras do tipo gelo/degelo;
- Predominância de fissuração típica na superfície na direção da maior dimensão, de aspecto poligonal (Figura 11). Pode ser equivocadamente interpretada como configuração de “retração por secagem” (fissuras de pequena abertura) ou fissuração de origem térmica (fissuras de notáveis aberturas);
- Fissuras de considerável abertura, com incidência transversal à maior dimensão do elemento, levantando a hipótese da falta de junta de contração;



- Fissuras de aspecto estrutural (lembrando as de corte) em locais de concentração de deformações;
- Abertura de juntas de construção do tipo horizontal e/ou sub horizontal, podendo atrair ao pensamento de “junta-fria” ou junta mal tratada;
- Movimentação das superfícies livres (alteamento de cristas de barragens e soleiras de vertedouros, deflexões a montante nas estruturas de barragens). Erroneamente alguns profissionais incumbidos de conferir tais deslocamentos acabam desprezando-os, pois eles são tomados por uma desconfiança.

**Figura 10** - Junta de contração surgida em razão da RAA, em obra nos EUA



**Fonte:** Andriolo, 1997, p. 15

**Figura 11** - Fissuras do tipo poligonais na superfície, em obra no Brasil



**Fonte:** Andriolo, 1997, p. 16

À luz das fissurações manifestadas, Andriolo (1997) declara a possibilidade do ingresso de água, agentes agressivos e a perda de estanqueidade da estrutura. Pelo fato de haver microfissuração na superfície dos agregados e descolamento, também existe a probabilidade do declínio da resistência e do módulo de elasticidade.

## 2.2 HISTÓRICO DA RAA NO MUNDO

Segundo Leps (1999) apud Silva (2008) os conhecimentos inaugurais da formação química do gel expansivo decorrente da reação entre os agregados e os álcalis do cimento foram concebidos por Stephenson, em 1916; Pearlson & Loughiln, em 1923; Holdem, em 1935; e Lea & Desch, em 1935.

Em 1922, transcorrido o período de 10 anos após sua construção, foi diagnosticado a deterioração devido à RAA na usina hidrelétrica de Buck, no New River (Virgínia-EUA) (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Entretanto, conforme mencionado anteriormente, o fenômeno da RAA veio à tona à literatura técnica no ano de 1940, na Califórnia, quando da publicação de um artigo pelo engenheiro Tom Elwood Stanton, que verificou quadros fissuratórios provocados por expansões em estruturas de concreto e rodovias nos EUA.

Desde então, a dimensão do problema trouxe, conforme Mizumoto (2009), crescente preocupação sobre o diagnóstico da reação em edificações ao redor do mundo.

Segundo Fournier & Bérubé (2000), a reação álcali-agregado tem sido verificada, desde 1940, em mais de 50 países, embora os sinais indicativos possam ser conferidos a diferentes motivos.

Após a relevante divulgação de Stanton, os pesquisadores Blanks & Meissner, em 1941, publicaram um artigo em referência à deterioração da barragem Parker Dam, nos EUA (POOLE, 1992 apud HASPARYK, 2011).

De acordo com Hobbs (1988) apud Pires (2009), ainda em função dos resultados obtidos na década de 40, várias localidades do planeta constataram o efeito deletério da RAA, sendo elas: Dinamarca (1950), Alemanha Ocidental (1960), Reino Unido (meados de 70) e Japão (1980).

Em torno de 1981, indícios de reação álcali-sílica (RAS) foram localizados em 23 elementos de concreto, com idades de 6 a 17 anos, na Escócia, Wales, Midlands e em outras regiões ao sudoeste da Inglaterra (PALMER, 1981 apud MEHTA & MONTEIRO, 1994).



Ao longo do tempo, dezenas de estruturas tiveram pareceres comprobatórios que indicaram o mecanismo degradante. Entre elas, as barragens de Chambon, na França; de La Tuque, no Canadá; de Sandouping, na China; de Val de La Mare, no Reino Unido; de Kouga, na África do Sul; assim como a via expressa Hanshin, no Japão, e trechos de via urbana em Joanesburgo, na África do Sul (SILVEIRA, 2006 apud ARRAIS, 2011).

Conforme Sanchez (2008) explica, no período de 1950 a 1960 houve uma espécie de desinteresse pelo assunto. Na década de 70, contudo, o surgimento de novas anomalias em elementos em inúmeros países resgatou a sua expressividade e, de lá pra cá, o tema tem sido abordado com maior diligência.

A Tabela 2 apresenta o número de casos da RAA em vários países.

**Tabela 2** - Ocorrência da RAA, em estruturas hidráulicas, em diversas nações

| <b>País</b>     | <b>Nº de casos</b> | <b>País</b>    | <b>Nº de casos</b> | <b>País</b>   | <b>Nº de casos</b> |
|-----------------|--------------------|----------------|--------------------|---------------|--------------------|
| África do Sul   | 10                 | Estados Unidos | 29                 | País de Gales | 05                 |
| Argentina       | 01                 | França         | 05                 | Paquistão     | 02                 |
| Austrália       | 02                 | Ghana          | 01                 | Portugal      | 04                 |
| Áustria         | 01                 | Índia          | 02                 | Quênia        | 01                 |
| Brasil          | 20                 | Inglaterra     | 01                 | Romênia       | 01                 |
| Canadá          | 41                 | Moçambique     | 01                 | Suíça         | 01                 |
| Costa do Marfim | 01                 | Nigéria        | 01                 | Uganda        | 01                 |
| Espanha         | 03                 | Noruega        | 07                 | Zambia        | 01                 |

**Fonte:** Arrais, 2011, p. 24

### 2.3 HISTÓRICO DA RAA NO BRASIL

As primeiras publicações no Brasil acerca da reação álcali-agregado foram desenvolvidas pelos pesquisadores do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) Gitahy e Ruiz, em 1963, quando examinaram os tipos de agregados encontrados para a construção da Barragem de Jupuí e estudaram as medidas disponíveis para atenuar o problema (PAULON, 1981 apud SANCHEZ, 2008).

Como exemplo habitual ressalta-se a magnitude do primeiro caso de RAA divulgado no Brasil: UHE Apolônio Sales (Moxotó), em 1985. Em 1988 foi identificada a reação na Barragem de Joanes II. Ambas estão situadas na região nordeste. Na UHE, houve a paralisação das turbinas pelo fato de suas pás rasparem o concreto da estrutura (DECHICHI, 1998; MUNHOZ, 2007).

De acordo com os relatos de Kihara & ScandiuZZi (1993) o diagnóstico da reação em barragens progrediu gradativamente ao longo dos anos, sendo algumas delas citadas: Paulo Afonso, Pedras, UHE Porto Colômbia, Billings/Pedras e Ilha dos Pombos.

A Tabela 3 exhibe alguns episódios da RAA em obras hidráulicas brasileiras.

**Tabela 3** - Casos de RAA em obras hidráulicas brasileiras

| Nome da Estrutura     | Tipo de estrutura          | Fim da construção | RAA notada no ano | Tipo de agregado                                     |
|-----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--|
| Billings-Pedras       | Barragem                   | 1936              | 1992              | Granito <sup>1</sup>                                 |
| Furnas                | Barragem                   | 1963              | 1976              | Quartzito <sup>1</sup>                               |
| Ilha dos Pombos       | Barragem                   | 1924              | 1991              | Gnaisse <sup>1</sup>                                 |
| Jaguara               | Barragem                   | 1971              | 1996              | Quartzito <sup>1</sup><br>Granito <sup>2</sup>       |
| Joanes II             | Barragem                   | 1971              | 1988              | Gnaisse <sup>1</sup>                                 |
| Jurupará              | Barragem                   | 1937              | -                 | Gnaisse <sup>1</sup><br>Biotita granito <sup>2</sup> |
| Mascarenhas de Moraes | Barragem                   | 1957              | -                 | Quartzito <sup>3</sup>                               |
| Moxotó                | Casa de Força              | 1974              | 1980              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |
| Paulo Afonso I        | Barragem                   | 1955              | 1978              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |
| Paulo Afonso II       | Barragem                   | 1962              | 1978              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |
| Paulo Afonso III      | Barragem                   | 1973              | 1978              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |
| Paulo Afonso IV       | Barragem                   | 1979              | 1985              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |
| Pedro-Beicht          | Barragem                   | 1932              | 1991              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |
| Peti                  | Barragem                   | 1945              | 1964              | Gnaisse <sup>1</sup>                                 |
| Porto Colômbia        | Vertedouro e Casa de Força | 1973              | 1985              | Cascalho e basalto <sup>3</sup>                      |
| Sá Carvalho           | Barragem                   | 1951              |                   | Gnaisse <sup>1</sup>                                 |
| Tapacurá              | Barragem                   | 1975              | 1990              | -  |
| Traição               | Usina Elevatória           | 1940              | 1980              | Milonito <sup>1</sup>                                |
| Túnel 6               | Tomada d'água              | 1974              | 1989              | Granito-gnaisse <sup>1</sup>                         |

1) Andriolo (2000);

2) Alves et al. (1997);

3) Veiga, Gonçalves e Hasparyk (1997).

**Fonte:** Munhoz, 2007, p. 32

Em estudos de Andriolo (2000), são apontados pelo menos 19 registros da ocorrência da RAA em barragens, vertedouros, casas de força e tomadas d'água. A expansão gerada pode afetar turbinas e geradores, culminando, muitas vezes, em interrupção de máquinas nas usinas hidrelétricas (VALDUGA, 2002).

Confirmações da RAA na Região Metropolitana do Recife têm ocorrido desde o começo dos anos 2000, entrando para as estatísticas barragens e fundações. Um dos exemplos mais emblemáticos foi a ampla investigação e detecção da reação nociva nos blocos da Ponte Paulo Guerra, em 2002, que surpreendeu a engenharia local. (ANDRADE, 2006; ANDRADE, 2014). O problema será descrito com maiores detalhes no item 2.7.1.

## 2.4 Métodos de Investigação da RAA

Os itens abaixo abordam os métodos laboratoriais usados na avaliação da potencial reatividade de agregados, procedimentos que se prestam à caracterização dos produtos expansivos gerados e demais indícios da presença da reação, bem como meios usados para o diagnóstico.

### 2.4.1 Métodos Laboratoriais para Análise da Reatividade dos Agregados

#### 2.4.1.1 Análise Petrográfica

Estuda em escala macroscópica e microscópica a amostra de rochas dos agregados que estão sendo investigados em relação ao seu potencial reativo. A análise microscópica se dá mediante ao microscópio óptico de luz transmitida, com dupla polarização e sistema conoscópico (ARRAIS, 2011).

Consiste, segundo Hasparyk (2011), no primeiro ensaio para reconhecer as fases mineralógicas possivelmente reativas tanto em rochas quanto em agregados. A parte 2 da ABNT NBR 15577:2008 prescreve as necessidades no sentido de obter uma boa amostragem.

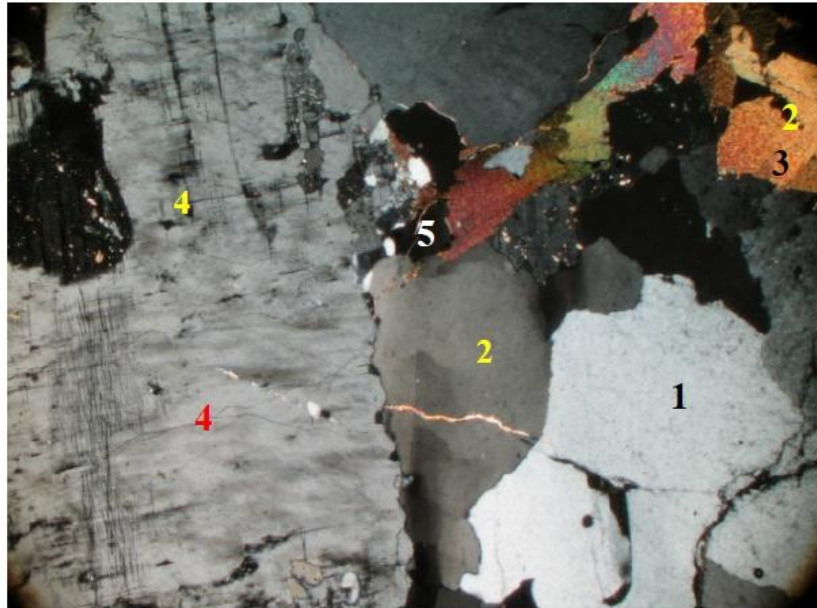
A análise petrográfica pode ser feita no agregado conforme as prescrições da ABNT NBR 15577-3 (exposto no item 2.1.6.2 deste trabalho) quando se trata de rocha ou agregado graúdo, ao passo que a ABNT NBR 7389:2009 preconiza a caracterização mineralógica (HASPARYK, 2011).

Segundo Fournier & Bérubé (2000), esse método laboratorial não é o único meio pelo qual a RAA é detectada, mas consiste em um importante procedimento que depende de outros ensaios para tal.

Para Pires (2009) a realização dessa análise deve ser conduzida por um petrógrafo experiente, haja vista a dificuldade de se obter resultados confiantes que denotam agregados potencialmente reativos.

A Figura 12 ilustra a análise petrográfica em um agregado e os minerais encontrados.

**Figura 12** - Fotomicrografia de agregado de pedra, onde: 1. Plagioclásio; 2. Quartzo; 3. Biotita; 4. K-Feldspato e 5. Opaco. Imagem ao microscópio ótico com luz polarizada, aumentada em 10x



Fonte: Andrade et al., 2006, p. 8

#### 2.4.1.2 Método Acelerado em Barras de Argamassa (MABA)

Desenvolvido por Oberholster & Davies (1986), atualmente é o método de maior aplicação no mundo, sendo no Brasil recomendado pela ABNT NBR 15577-4 (TRINDADE, 2011).

Segundo Fournier & Bérubé (2000), o método acelerado em barras de argamassa pode ser usado para qualificar o potencial reativo de agregados graúdos e miúdos na reação álcali-sílica, porém não é o teste mais recomendado a ser feito em rochas carbonáticas consideradas potencialmente expansivas.

Conforme Hasparyk (2011), uma das vantagens do método é a rapidez da avaliação: em até 30 dias, o agregado em estudo recebe o diagnóstico quanto a sua reatividade.

O procedimento laboratorial, como sugere a ABNT NBR 15577-4, consta em: moldagem de três barras prismáticas de argamassa (25 mm x 25 mm x 285 mm), mostradas na Figura 13, feitas com “cimento padrão” e na presença do agregado em questão, cuja relação cimento:agregado é de 1:2,25 e a relação água:cimento de 0,47. Posteriormente, levam-se, em temperatura ambiente, as barras a cura úmida por um período de 24 horas (HASPARYK, 2011).

**Figura 13** - Barras de argamassa utilizadas no ensaio



**Fonte:** Sanchez, 2008, p. 100

Em seguida, de acordo com Hasparyk (2011), as barras de argamassa são submersas, por 28 dias, em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 N, mantendo-se a 28°C. Nesse período, medem-se as barras, calcula-se a média das três e apresenta-se os resultados em porcentagem de expansão. A ABNT NBR 15577-1 preconiza o valor limite de 0,19% aos 30 dias para declarar a reatividade do agregado.

Mesmo após a confirmação da potencialidade reativa do agregado, pode ser necessário proceder ao ensaio em prismas de concreto (item a seguir), tendo em vista a maior confiabilidade promovida por esse método. Além disso, o MABA está sujeito a resultados falso positivos e negativos e também a divergências entre as verificações obtidas em laboratório e as vistas em campo (HASPARYK, 2011).

Por motivos da agressividade do ambiente, este ensaio tem o intuito de apenas aceitar os agregados verificados, e não de recusá-los (BELLEW, 1997 apud TRINDADE, 2011).

#### 2.4.1.3 Método dos Prismas de Concreto

O método dos prismas de concreto é considerado um ensaio efetivo para prever o desempenho dos agregados (SALLES, KUPERMAN & BERTOLUCCI, 2006).

No Brasil, a parte 6 da ABNT NBR 15577 descreve este método, idealizado com o objetivo de assemelharem-se mais fielmente os resultados obtidos no laboratório com os

verificados em campo. Como mencionado, o método dos prismas de concreto conduz a resultados mais precisos que o acelerado em argamassas.

Conforme afirma Hasparyk (2011), este ensaio afere as expansões geradas em um período de 1 ano, avaliando se o agregado graúdo ou miúdo é reativo ou não no sentido de desencadear a RAS.

O processo laboratorial, de acordo com a ABNT NBR 15577-6, consiste em: moldagem de no mínimo três prismas de concreto (75 mm x 75 mm x 285 mm) feitos com “cimento padrão” e na presença do agregado em estudo. Em seguida, leva-os a cura úmida por 24 horas e, depois, coloca-os em um recipiente com alta umidade a 38°C por 1 ano (HASPARYK, 2011).

**Figura 14** - Moldes e o instrumento de leitura usado no método



Fonte: Daher, 2009, p. 62

A Figura 14 apresenta os moldes e equipamento de leitura das expansões.

Os prismas são constantemente medidos e calculadas suas expansões pela média dos três exemplares. A ABNT NBR 15577-1 estabelece o valor máximo de 0,04% em um ano, no sentido de definir a reatividade do agregado. Ressalta-se a confiabilidade do método, que para Hasparyk (2011) não induz a diferenças entre os ensaios de laboratórios com os notados em campo.

Para a mesma autora, no que se refere aos métodos disponíveis empregados na avaliação da eficácia de cimentos e adições na precaução à RAS, tem-se que são similares aos usados na detecção da reatividade do agregado.

Todos os cimentos normalizados, seja ligado a adições pozolânicas ou não, podem ser testados no método acelerado em barras de argamassa, vide a ABNT NBR 15577-4. Se

sílica ativa ou metacaulim forem utilizados, é necessário incluir um aditivo superplastificante na mistura (HASPARYK, 2011).

A mesma parte 4 citada sugere a variação no teor das adições de modo a conseguir o menor valor capaz de minimizar as expansões no limite de 0,10% aos 16 dias, preconizada pela ABNT NBR 15577-1 (HASPARYK, 2011).

De acordo a pesquisadora, o método dos prismas de concreto examina a junção entre materiais cimentícios e adições minerais, em contato com agregado potencialmente reativo. A ABNT NBR 15577-6 indica a análise das expansões por até 2 anos, sendo que a variação deve se encontrar inferior a 0,04%.

#### 2.4.2 Métodos Auxiliares no Diagnóstico da RAA

Vistoriar periodicamente uma estrutura por meio de inspeção visual e acompanhamento do seu comportamento - tendo como aliado o emprego de técnicas laboratoriais - são serviços que determinam se a causa das manifestações patológicas verificadas é ou não devido à RAA.

Para tanto, além dessas investigações, sugere-se acrescentar informações para compor o correto diagnóstico, tais como: quais foram os materiais usados no concreto e as suas características e recolher dados dos elementos da estrutura (HASPARYK, 2011).

No âmbito do monitoramento in loco, destacam-se os instrumentos utilizados na fiscalização de alguns dos sintomas enquadrados nos aspectos em grande escala vistos em barragens, como exposto no item 2.1.7.2. Conforme pondera Hasparyk (2011), são eles: extensômetros múltiplos de haste, medidores triortogonais, medidores de distância relativa de alta precisão, rede geodésica e ultrassom.

A partir dos estudos efetuados, extrações de testemunhos de concreto (através de sonda rotativa) e obtenção de amostras poderão ser necessárias, os quais serão levados ao laboratório a fim de aprofundar a observação (HASPARYK, 2011).

Um dos métodos mais utilizados em laboratório é o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Esta análise se presta a realizar ensaios de amostras de concreto ou argamassa que tiveram seu potencial reativo analisado, assim como examinar porções de elementos com prenúncio de expansão (NOGUEIRA, 2010).

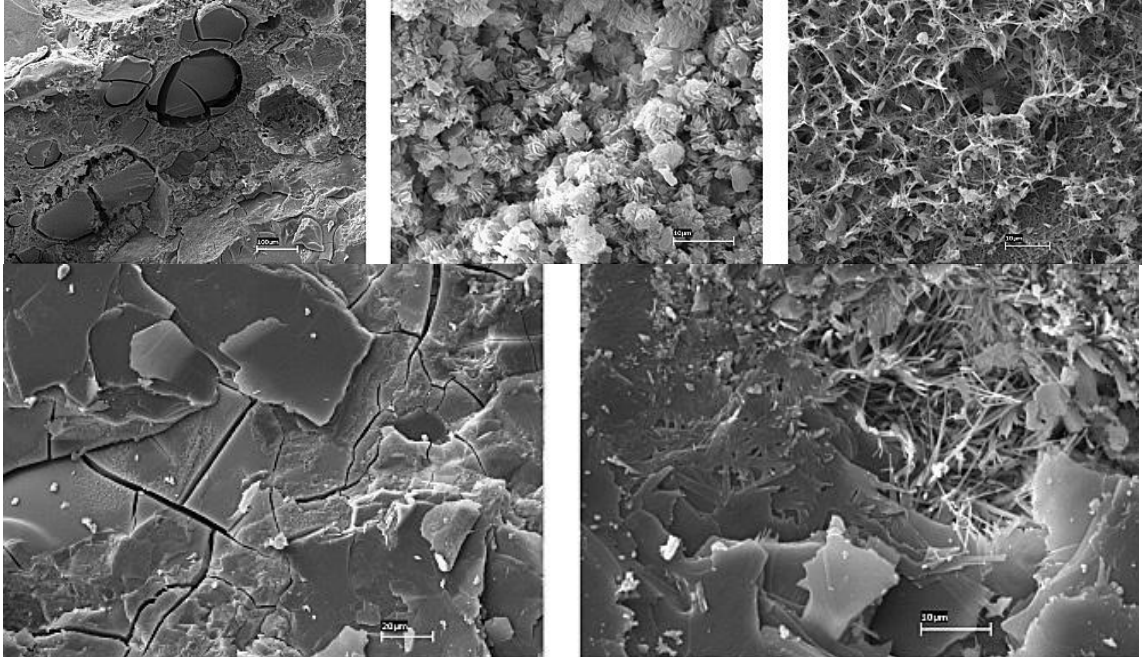
Ainda segundo Nogueira (2010), a aplicação do MEV à RAA permite ainda distinguir os inúmeros tipos de géis produzidos, localizar as bordas de reação na interação



pasta-agregado e a presença de gel álcali-silicoso espalhado na argamassa, fissuras e poros do agregado, possibilitando o reconhecimento exato da morfologia dos produtos gerados.

A Figura 15 mostra as imagens de concreto com RAA obtidas através da MEV.

**Figura 15** - Imagens obtidas pela MEV de concreto com RAA. No canto esquerdo superior, nota-se o gel gretado ocupando os poros



**Fonte:** CD-ROM - Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais - ISAIA, G.C. 2ªed. IBRACON, São Paulo, 2010.

## 2.5 MEDIDAS PREVENTIVAS NO COMBATE À RAA

Uma dosagem bem feita do concreto na etapa de projeto pode garantir a prevenção da reação álcali-agregado, apesar da falta de métodos confiáveis para frear o ataque quando já está em andamento (BERTOLINI, 2010).

Segundo o mesmo autor, o emprego de agregados não reativos é um importante aliado nessa questão, porém tal escolha depende da disponibilidade local. Se não for possível suprimir agregados reativos, outros cumprimentos devem ser observados para privar a ocorrência da RAA, a saber: delimitar o teor de álcalis do cimento, reduzir o consumo de cimento da mistura e utilizar cimentos com adições pozolânicas ou de alto-forno, como será relatado adiante.

Para Cincotto & Munhoz (2008) analisar a reatividade dos agregados para posteriormente escolher, sob prescrição desse exame, o cimento Portland mais adequado constitui a melhor maneira de combater a reação.



De acordo com a ABNT NBR 15577-1, a ação preventiva divide-se em três categorias, a partir das condições de exposição: mínima (estrutura maciça em contato com água), moderada (estrutura não maciça exposta à umidade) ou forte (estrutura especial e enquadrada em um dos dois primeiros grupos).

### 2.5.1 Emprego de Adições Mineraias na Fabricação do Concreto

Nos dias atuais, a produção do concreto com adições mineraias em meio aos agregados reativos ainda é o mecanismo exclusivo de se evitar a RAA (CARDOSO, 2008).

Ao substituir parte do cimento por esses materiais, é reduzido o teor de álcalis disponível para a reação. Soma-se a isso ao fato de que concreto produzido com adições, se feitos com o cuidado necessário, diminui a sua porosidade, dificultando, em tese, o ingresso de água externa no seu interior, bem como agentes agressivos.

As adições mineraias são bastante diversificadas, sendo as mais conhecidas e usadas no combate à RAA: escória de alto-forno, cinza volante, sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz. Além destas, existem adições mineraias naturais, processadas com o intuito de obter uma pozolana: argilas diatomáceas, vidros vulcânicos e folhelhos calcinados (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

As tabelas abaixo, baseadas na ABNT NBR 15577-1, mostram as medidas para minimizar o surgimento da RAA e requisitos dos materiais inibidores, utilizando as adições mineraias para tal.

**Tabela 4** - Ações preventivas em função da categoria de intensidade

| Intensidade da ação preventiva   | Medidas de mitigação   |
|--|--|
| Mínima   | 1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 3,0 kg/m <sup>3</sup> de Na <sub>2</sub> O equivalente <sup>a), b)</sup> ou<br>2) Utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z, conforme ABNT NBR 11578, ou CP III, conforme ABNT NBR 5735, ou CP IV, conforme ABNT NBR 5736, ou<br>3) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade moderada                            |
| Moderada   | 1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> O equivalente <sup>a), b)</sup> ou<br>2) Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60 % de escória conforme ABNT NBR 5735 ou<br>3) Utilizar cimento CP IV, com no mínimo 30 % de pozolana conforme ABNT NBR 5736 ou<br>4) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade forte |
| Forte  | 1) Utilizar materiais inibidores da reação de acordo com a Tabela 3, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio previsto em 7.2 ou<br>2) Substituir o agregado em estudo.  |
| <sup>a)</sup> Aceita-se considerar o aporte de álcalis trazido ao concreto pelo cimento (álcalis totais determinados pelas ABNT NBR NM 11-2, ABNT NBR NM 17 ou ABNT NBR 14656), na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto.<br><sup>b)</sup> Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> = 0,658 K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O. |  |

Fonte: ABNT NBR 15577-1:2008

**Tabela 5** - Requisitos dos materiais inibidores da RAA

| Material   | Requisitos da composição   |
|--|--|
| Cimento Portland tipo CP II E e CP III   | Escória de alto-forno no cimento em teores suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,10 % aos 16 dias (ver 7.2.2 e Figura 3), quando ensaiadas de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 % em dois anos (ver 7.2.3 e Figura 3), quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.                         |
| Cimento Portland tipo CP II-Z e CP IV  | Materiais pozzolânicos no cimento em teores suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,10 % aos 16 dias (ver 7.2.2 e Figura 3), quando ensaiadas de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04 % em dois anos (ver 7.2.3 e Figura 3), quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.                        |
| Sílica ativa e metacaulim em combinação com qualquer tipo de cimento Portland  | Os teores necessários de sílica ativa e metacaulim e sua eficácia para auxiliar na mitigação das expansões decorrentes de reações deletérias devem ser estabelecidos pelo ensaio prescrito na ABNT NBR 15577-5, atendendo ao limite de 0,10 % aos 16 dias (ver 7.2.2 e Figura 3), ou pelo ensaio prescrito na ABNT NBR 15577-6, sendo menor do que 0,04 % em dois anos (ver 7.2.3 e Figura 3). |
| <p>NOTA Em obras especiais de concreto massa, como é o caso das barragens, podem ser usados outros materiais, ou misturas de materiais como inibidores da reação álcali-agregado, tendo em vista a grande necessidade de se reduzir a retração térmica do concreto nesse caso e, portanto, de controlar o desenvolvimento do calor de hidratação do cimento, sendo desejável alcançar elevadas deformações em função do proporcionamento dos materiais, o que diferencia essas estruturas das convencionais.</p> |  |

Fonte: ABNT NBR 15577-1:2008

Vale destacar que o tipo empregado depende, fundamentalmente, das suas características, da natureza do agregado e de sua potencial reatividade (HASPARYK, 2011).

A seguir são descritas as principais adições minerais empregadas diretamente na produção do concreto ou substituindo parcialmente o clínquer no fabrico do cimento.

#### 2.5.1.1 Sílica Ativa

Conforme Munhoz (2007), a sílica ativa (Figura 16) é um subproduto industrial oriundo da produção de ferrosilício ou silício elementar, e é formada por partículas esféricas vítreas de natureza silicosa, de extrema finura, de densidade relativa da ordem de 2,2g/cm<sup>3</sup>.

Não obstante alguns produtores adicionarem sílica ativa no fabrico do cimento Portland, seu uso significativo é diretamente no concreto (KIHARA & BUCHER, 1986 apud MUNHOZ, 2007).

À proporção que cresce o teor de sílica ativa em substituição ao cimento (5%, 10% e 15%, por exemplo), ocorre um incremento na viscosidade e na tensão de escoamento das pastas, em virtude da elevada área específica das partículas e da sua reatividade pozzolânica (PARK, 2005 apud MUNHOZ, 2007).

**Figura 16** - Sílica ativa empregada em concreto



**Fonte:** <http://www.construtec.ind.br/produtos/aditivos-adicoes-e-auxiliares-da-confeccao-de-concreto-e-argamassa>

Em estudo realizado por Hasparyk, Monteiro e Carasek (2000) apud Tiecher et al. (2006), observou-se que o teor de sílica ativa - sobre o consumo de cimento - considerado ideal para impedir a RAA é de 15% e o teor péssimo é de 4%.

Os pesquisadores Cincotto & Munhoz (2008) chegaram à mesma conclusão que o teor mínimo para reduzir a chance de a reação vir à tona é de 15%, desempenho conferido especialmente pela diminuição de hidróxido de cálcio e pelo reduzido diâmetro do material.

Com mesmo efeito, experimentos com sílica ativa conduzidos por Barata, Hasparyk & Lima (2006) apud Hasparyk (2011) demonstraram que o teor de 8% é considerado ótimo, em substituição à massa de cimento, para evitar o fenômeno expansivo, mesmo interagindo com agregado de vidro com alta reatividade.

#### 2.5.1.2 Metacaulim

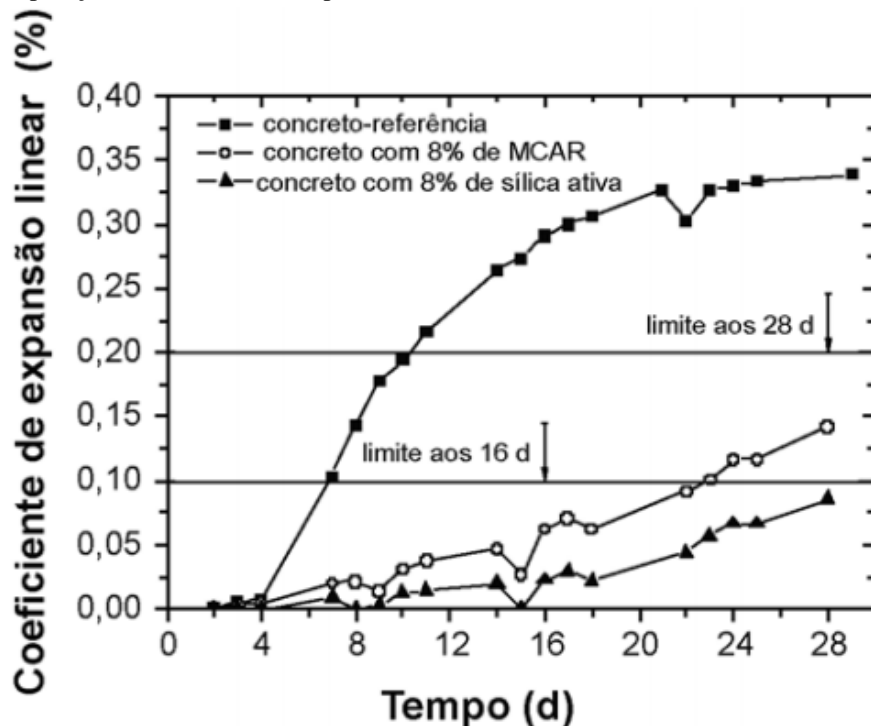
O metacaulim é uma adição mineral aluminossilicosa obtida através da calcinação (temperatura entre 600°C e 900°C) de algumas variedades de argilas, como os caulins e as cauliniticas (SILVA, 2010).

Em relatório técnico elaborado por Helene & Medeiros (2004) sobre a influência do MetacaulimHP nas propriedades do concreto observa-se os ótimos resultados do material na mitigação das reações expansivas provocadas pela RAA. Segundo os autores, esta adição é recomendada para condições com agregados potencialmente reativos na existência de umidade, como verificado em barragens, reservatórios e fundações úmidas.

De maneira geral, baseado em diversos estudos sobre o comportamento do metacaulim em meio a agregados de distintas reatividades, é consenso assegurar que a faixa aplicada está compreendida entre 8% e 15% (HASPARYK, 2011).

O Gráfico 6 faz uma comparação da inibição da reatividade entre um concreto feito com 8% de metacaulim e um fabricado com a mesma porcentagem de sílica ativa. Verificam-se os melhores resultados para o concreto com sílica ativa.

**Gráfico 6** - Comparação entre a reatividade potencial de concreto-referência, com metacaulim e com sílica ativa



Fonte: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v54n331/a0754331.pdf> - Carmo, J.B.M.; Portella, K.F.

Pesquisa feita por Cincotto & Munhoz (2008) mostrou que o teor mínimo de 15% de metacaulim atenua a possibilidade de expansão dos agregados estudados, resultado possivelmente ligado à composição química dos materiais e alta área específica das partículas.

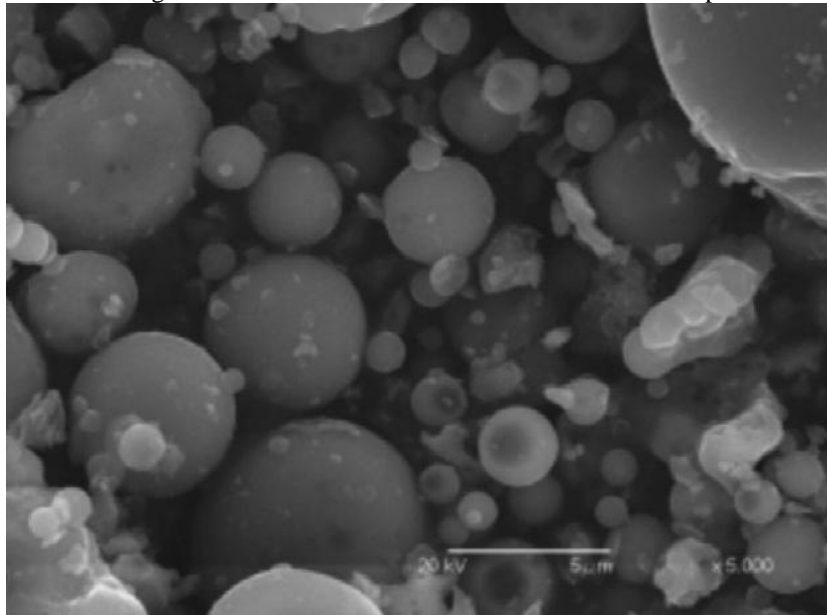
Estudos desenvolvidos por Munhoz (2007) sobre as quantidades da adição quando em contato com basalto e milonito reativos, revelaram os valores de 13% e 15%, respectivamente, como sendo os teores mínimos necessários ao impedimento da reação.

### 2.5.1.3 Cinza Volante

São pequenas partículas esféricas de vidro silico-aluminosas obtidas em função da combustão de carvão pulverizado nas usinas termoeletricas, conforme ilustra a Figura 17 (DECHICHI, 1998).

Desse modo, por ser um material de grande finura, existe maior propensão para a reação com o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento (SABBAG, 2003). Assim, sob a descrição do mesmo autor, a porosidade do concreto diminui, aumentando a resistência em ambientes agressivos.

**Figura 17** - Micrografia de cinza volante obtida através do MEV e ampliada em 5000x



**Fonte:** CD-ROM - Concreto: ciência e tecnologia- ISAIA, G.C. 1ªed. IBRACON, São Paulo, 2011

Para permitir a inibição da reação álcali-agregado, o intervalo de teores que tem se mostrado oportuno está situado entre 30% a 40% (NEVILLE, 1997 apud SABBAG, 2003).

Experimentos comandados por Tiecher (2006) revelaram que o cimento pozolânico CP IV, com cerca de 27% de cinza volante, comprovou ser o mais eficaz na presença de agregados provenientes dos Estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. O aglomerante dificultou a expansão na maior parte das amostras investigadas (HASPARYK, 2011).

De acordo com Hasparyk (2005), alguns autores sugerem, a partir de testes, que o teor ótimo de cinza volante, em substituição ao cimento, esteja situado na faixa de 25% a

50%. De semelhante visão compartilham Cincotto & Munhoz (2008), que estabelecem os teores de 25% a 35% quando inseridos no cimento.

#### 2.5.1.4 Escória de Alto-Forno

Escória de alto-forno é o nome dado ao resíduo não metálico resultante da produção do ferro-gusa. Para garantir a utilização na fabricação do cimento, substituindo o clínquer, ou como adição complementar em concretos, a escória deve passar por um resfriamento brusco que resulte em um material majoritariamente amorfo e potencialmente reativo, recendo o nome de escória granulada de alto-forno, representada na Figura 18 (DAL MOLIN, 2011).

**Figura 18** - Escória granulada de alto-forno



**Fonte:** <http://www.ferroeste.com.br/noticias/52/granulacao-de-escoria>

Segundo Hasparyk (2001), entre as adições minerais descritas é a que carece de maiores teores com o intuito de minorar as ações nocivas da RAA. No entanto, o cimento de alto-forno (CP III) é considerado o mais útil para essa função (CINCOTTO & MUNHOZ, 2008).

Em um trabalho conduzido por Munhoz (2007), foram investigados alguns teores de escória (15%, 30%, 45% e 60%) possíveis de agir na redução das expansões deletérias, em contato com basalto e milonito reativos. O resultado apontou para 45% de escória na presença do basalto e 60% na existência do milonito.



Em pesquisa desenvolvida por Mizumoto & Salles (2012) notou-se que as amostras de escória moída misturadas ao cimento CP II F-32 denotaram o teor mínimo de 40% para impedir, na presença de agregado basáltico reativo, a reação álcali-agregado.

#### 2.5.1.5 Cinza de Casca de Arroz

Conforme Tashima (2006), a cinza de casca de arroz é um resíduo procedente da obtenção do arroz, formado basicamente por sílica e considerado por muitos pesquisadores como recurso alternativo na aquisição de sílica amorfa com elevado grau de reatividade.

Assim como as adições minerais descritas anteriormente, a cinza da casca de arroz melhora as características do concreto, atuando no refinamento da porosidade e no aumento da permeabilidade (TRINDADE, 2011).

O primeiro estudo no Brasil a fim de esclarecer alguns aspectos do efeito da adição na minimização dos danos causados pela RAA foi proposto por Hasparyk (1999). Nas atividades experimentais, a pesquisadora verificou que o teor ótimo de 15% reduzia as expansões mesmo na presença de basalto e quartzito reativos (SILVA, 2007).

Os variados experimentos produzidos sobre o tema permitem sugerir um teor de cinza de casca de arroz amorfa entre 8% e 15%, faixa aplicável desde que a massa de concreto receba aditivo plastificante ou superplastificante (HASPARYK, 2011).

A Figura 19 mostra o aspecto da cinza de casca de arroz.

**Figura 19** - Cinza de casca de arroz



**Fonte:** <http://unisinos.br/blogs/arquitetura/2009/10/09/residuos-do-arroz-na-construcao-civil/>

## 2.6 Medidas Terapêuticas para Mitigar a Reação

Considerando-se a problemática de ainda não existirem métodos seguramente eficazes para regenerar o concreto quando este se encontra acometido pela RAA, há que se lançar mão de técnicas, intervenções e medidas corretivas que atuem de modo a mitigar o fenômeno expansivo.

Na impossibilidade de recuperar o elemento afetado, seja pelo impedimento econômico ou por questões puramente técnicas-estruturais, uma providência racional seria efetuar a demolição e reconstrução. Apesar de ser viável, são raros os exemplos. Um dos casos mais notórios é o da barragem Drum Afterbay, na Califórnia, reedificada imediatamente após sua demolição.

Respaldado nessa questão, pode-se distinguir os tratamentos acessíveis em tratamento das causas e tratamento dos sintomas, os quais serão retratados a seguir.

### 2.6.1 Tratamento das Causas

No que concerne ao tratamento das causas, os dois meios atualmente disponíveis para prevenir ou desacelerar as reações deletérias já instaladas são: secagem do concreto, para extinguir a umidade essencial ao progresso da RAA, ou por meio da alteração das características da reação, mediante a aplicação de produtos que a freie (SILVA, 2009).

Considerando o segundo meio citado, aparecem os compostos à base de lítio utilizados em concretos contaminados pela RAA, os quais são comprovadamente efetivos e demonstrados na literatura técnica, onde se verifica um robusto número de trabalhos publicados sobre essa intrigante questão (SILVA, 2009).

Segundo Cândido (2009), a vanguarda das pesquisas feitas com compostos à base de lítio para controlar as expansões por conta da RAS é atribuída a McCoy e Caldweel, em 1951. Eles estudaram mais de 100 compostos entre sais metálicos, óleos, inúmeros aditivos, ácidos, produtos químicos orgânicos e proteínas, chegando à conclusão que os mais prósperos seriam os materiais à base de lítio.

O teor de lítio necessário para regular as expansões devidas à RAA é variável e depende dos seguintes fatores: o tipo de composto de lítio empregado, a procedência do agregado reativo e a quantidade de hidróxidos alcalinos disponíveis no concreto (FOURNIER & BÉRUBÉ, 2000).



Compostos como o hidróxido de lítio ( $\text{LiOH}$ ) e o carbonato de lítio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) devem ser utilizados com cautela para reduzir a reação álcali-sílica. Em dosagens desajustadas, pode acontecer um aumento importante da concentração de íons hidroxila nos poros do concreto, fazendo com que, paradoxalmente, cresça as expansões ao invés de minorá-las (DIAMOND, 1999 apud SILVA, 2009).

No contexto da precaução da expansão deletéria, Priszkulnik (2006) afirma que o nitrato de lítio é misturado durante o processo da fabricação do concreto em teor compatível ao agregado e a porção de álcalis do cimento. Além disso, este composto é empregado em concretos acometidos pela reação, como visto na Figura 20.

**Figura 20** - Aplicação de nitrato de lítio em pavimento de concreto afetado pela RAA



**Fonte:** file:///C:/Users/user/Downloads/19-solucao-raa.pdf

No que tange à presença de água a adoção de agentes hidrófobos (impregnantes, penetrantes, selantes e membranas) consiste em formar uma barreira que impeça a entrada de umidade no concreto (ANDRIOLO, 1997).

Os materiais usados em tratamentos superficiais, como os impregnantes e penetrantes, devem possuir elasticidade suficiente para não fissurarem ou até fragmentarem por conta das expansões inerentes à RAA. Para tanto, segundo Gomes (2008) são recomendados os seguintes componentes:

- Pinturas à base de silano e siloxano (Figura 21) são eficientes em restringir o avanço das expansões em peças delgadas de concreto;

- Compostos à base de lítio são empregados por meio de aspersão na superfície ou por impregnação, porém a maior limitação reside na pequena profundidade de penetração no concreto, entre 2,5 e 3,0 cm;
- Injeção de CO<sub>2</sub> (gás carbônico), alternativa que reduz a alcalinidade do concreto, requer muita cautela, pois pode colocar em risco a passivação do aço e ser o responsável pela corrosão das armaduras.

Da mesma maneira que os impregnantes e penetrantes, a aplicação dos selantes fundamenta-se no impedimento do acesso da água exterior ao concreto. As formas de utilização são por pintura, injeção ou emboço, e dentre os materiais para essa finalidade compreende-se as pastas, argamassas e concretos, e também pinturas e/ou argamassas poliméricas (ANDRIOLO, 1997).

Nos dias atuais existem vários tipos de membranas que ajudam a proteger a estrutura de concreto, entre as quais as mantas asfálticas e mantas de PVC. Enquanto a primeira tem a desvantagem de possuir prazo de validade restrito e fragilidade quando da execução de furos, a segunda pode ser aplicada sobre geotêxteis não colados ao concreto, de uso em barragens (GOMES, 2008).

**Figura 21** - Lado direito de muro tratado com pintura à base de siloxano, em Quebec-Canadá



**Fonte:** Thomas et al., 2007 apud Silva, 2009, p. 47

## 2.6.2 Tratamento dos Sintomas

De acordo com Hasparyk (2011), existem algumas práticas e recomendações aplicadas em diversas estruturas e elementos de concreto lesionados com a finalidade de refrear as consequências e manifestações do fenômeno deletério, quais sejam:

- Aberturas de juntas, através de cortes na estrutura, para atenuar as tensões pontuais e liberar as deformações em certas direções. Esta solução pode ser provisória à medida que a reação se desencadear (HASPARYK, 2011);

- Calafetagem de fissuras, que cumpre o papel da proteção e reestabelece temporariamente o monolitismo do concreto danificado, mas não evita a continuação das expansões e o aparecimento de novas fissuras (BATISTA, 2013);

- Restrições físicas pelo confinamento ou encapsulamento do concreto e reforços estruturais também são medidas de assegurar a estabilidade e garantir a integridade dos elementos de concreto afetados (FOURNIER & BÉRUBÉ, 2000).

## 2.7 ESTUDOS DE OBRAS: A INÉDITA OCORRÊNCIA DA RAA EM BLOCOS DE CONCRETO DE FUNDAÇÕES NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

Em blocos de concreto de uma ponte e de uma centena de edifícios urbanos localizados na Região Metropolitana do Recife (RMR) foram confirmados casos singulares de manifestações típicas de produtos expansivos, especialmente quadros intensos de fissuração. Na maioria dos episódios, após os ensaios realizados em testemunhos extraídos, constatou-se a inédita presença da RAA (GOMES, 2008).

O reconhecimento da possível ocorrência da reação nessas obras teve como mote o desabamento do Edifício Areia Branca, em 2004, situado em Jaboatão dos Guararapes, que ganhou repercussão nacional. É importante frisar que a queda do edifício, à época com 26 anos, se deu por conta de falhas de concretagem nos arranques dos pilares da fundação (ANDRADE, 2014).

Segundo expõe Andrade (2014), a partir de então houve um aumento vertiginoso de inspeções em fundações de concreto na RMR, sendo estas investigações levadas a cabo pelos próprios frequentadores e moradores dessas edificações.

No Brasil, os casos de RAA estavam restritos a obras hidráulicas de grande porte, como barragens e hidrelétricas, pois, como se sabe, são nessas estruturas que ocorrem maior

aporte de umidade, fator essencial para emergir o fenômeno. Em algumas situações a reação foi diagnosticada em distintas estruturas, mas não passou de eventos afastados e exclusivos (ANDRADE, 2006).

Esse panorama prejudicou a engenharia pernambucana, já que a percepção da comunidade técnica era de que a reação álcali-agregado não afligiria pequenos elementos de concreto armado.

Outra dificuldade encontrada está no fato de que as superestruturas de concreto de quase todas as construções investigadas até então não exibiram sintomas que pudessem atribuir a responsabilidade aos elementos de fundação deteriorados.

De fato, a experiência inovadora despertou a atenção de todos os profissionais da construção civil envolvidos, que se viam apreensivos diante da revelação de um grande número de diagnósticos que poderiam colocar em risco à saúde estrutural das edificações.

Diante da necessidade de solução, o SINDUSCON-PE (Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de Pernambuco) criou uma cartilha orientativa intitulada: “Reação álcali-agregado e diagnóstico do potencial de reatividade dos agregados e do potencial de inibição de RAA com uso de cimentos e adições minerais disponíveis na Região Metropolitana do Recife”. Este documento aborda critérios que visam à prevenção do problema em construções futuras.

Além disso, para entender o comportamento das obras acometidas pela RAA, as entidades locais do setor promoveram uma série de discussões e reuniões, convocando especialistas para tratar do tema (SILVA, 2007).

Nesse cenário, apesar da desconfiança, somente um edifício comercial foi desocupado, o qual, conforme menciona Andrade (2014), pode ser apontado com um dos mais atingidos pelas reações expansivas.

Entre todas as investigações, destacam-se 3 casos situados na cidade do Recife-PE e exclusivamente significativos pelos problemas patológicos apresentados, sendo discorridos nos itens que se sucedem.

### 2.7.1 Ponte Paulo Guerra

A Ponte Paulo Guerra, inaugurada em 1977, está localizada sobre a bacia do Rio Pina e é um dos importantes acessos para a zona costeira da Região Metropolitana do Recife (Figura 22).

**Figura 22** - Vista da Ponte Paulo Guerra



**Fonte:** <http://www1.concrepoxi.com.br/cms/opencms/concrepoxi/pt/portfolio/recuperacao.html>

Transcorridos 25 anos da sua concepção, sinais de deterioração foram observados na infraestrutura e superestrutura. Não obstante o meio agressivo propiciar condições para a degradação do concreto, especialmente em razão da ponte estar sujeita à variação das marés, houve falha na escolha dos materiais utilizados e falta de supervisão durante a etapa de construção (HELENE, PEREIRA & CASTRO, 2006).

No começo de 2002, a Prefeitura da Cidade do Recife resolveu proceder a uma ampla análise do estado da ponte, em consequência do acentuado grau dos sintomas patológicos que colocavam em cheque à solidez estrutural (ANDRADE, 2014).

Durante a investigação foram constatados: manchas típicas de corrosão de armaduras, eflorescência causada pela lixiviação dos constituintes do concreto, desgaste dos aparelhos de apoio de vigas, degradação no tabuleiro, buzínates, juntas de dilatação e intenso quadro fissuratório nos blocos de coroamento (GOMES, 2008).

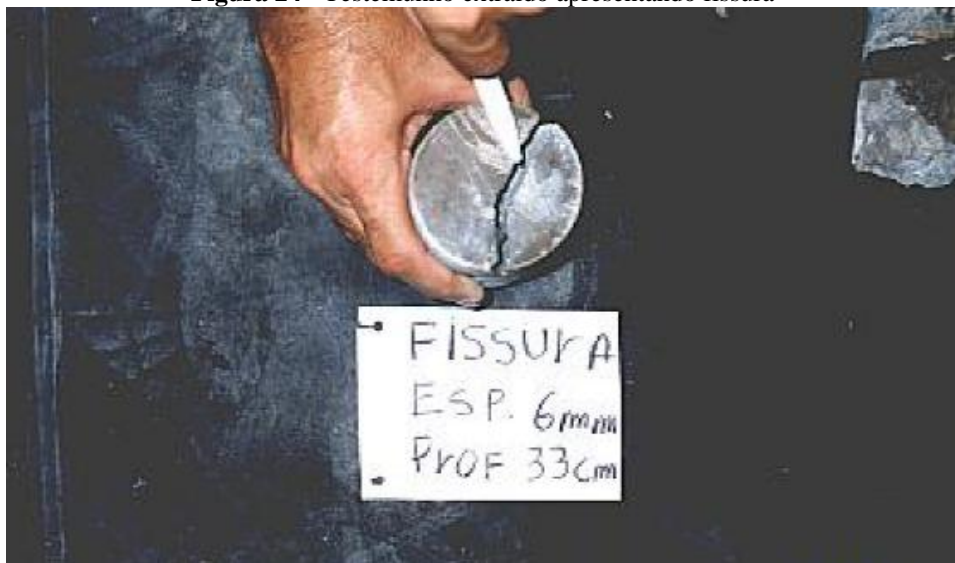
Particularmente relevante, a fissuração excessiva em forma de “mapa”, encontrada em alguns blocos de coroamento, tal como mostrada na Figura 23, acompanhada de lixiviação significativa, fomentou os profissionais envolvidos a conduzir vasta inspeção para identificar quais eram as causas do problema.

**Figura 23** - Bloco apresentando lixiviação e fissuração em forma de “mapa”



Fonte: Gomes, 2008, p. 62

**Figura 24** - Testemunho extraído apresentando fissura



Fonte: Helene et al., 2002 apud Gomes, 2008, p. 76

Os ensaios petrográficos realizados acusaram a presença de fissuras na interface agregado-pasta e nos agregados (GOMES, 2008). Além disso, estudos feitos por Helene, Pereira & Castro (2006), a partir de testemunhos extraídos, detectaram gel na borda dos agregados e na zona de transição agregado-pasta, fissuras na superfície (Figura 24) e redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto.

Segundo explica Gomes (2008), os agregados graúdos encontrados nos blocos apresentam natureza reativa, entre os quais cristais de quartzo microgranulados e cristais de quartzo com forte extinção ondulante.

Assim, ficou evidente a presença da interação deletéria entre os álcalis e agregados, verificando a existência da reação álcali-agregado. Comprovou-se, também, que o ambiente onde a ponte está inserida, com altas temperaturas registradas e farta disponibilidade de água, apressou o aparecimento das lesões.

A equipe de investigação levantou suspeitas quanto ao uso dos agregados reativos na Paulo Guerra, questionando se não haveria outras estruturas de concreto na RMR que tivessem consumido o mesmo material. Essa desconfiança, porém, não se traduziu em novas apurações (ANDRADE & FIGUERÔA, 2007).

Em relato via e-mail, o professor Tibério Andrade adverte que, apenas com a confirmação da RAA na aludida ponte, “*seria difícil convencer moradores de edifícios e órgãos públicos a começar a escavar fundações para verificar problemas*” se tais edificações não revelavam mostras de degradação. Para ele, inspecionar traria “*transtornos*” e envolveria “*recursos*”- sobretudo baseado em um caso que não chocou a sociedade - e acrescenta que “*os paradigmas são difíceis de serem quebrados*”.

Em 2004, a EMLURB, entidade pública vinculada à Prefeitura do Recife, promoveu o certame licitatório para restauração da obra de arte. A empresa recifense CONCREPÓXI ENGENHARIA LTDA foi a vencedora dos serviços executivos, que por sua vez contratou a J.L.C. Engenharia de Projetos Ltda, situada no Rio de Janeiro, para realizar o projeto estrutural de reabilitação da ponte (J.L.C. ENGENHARIA DE PROJETOS, 2005 apud GOMES, 2008).

A obra de remodelação primou pela recuperação e reforço dos blocos de fundação existentes, tendo início em 2005 e término no segundo semestre de 2006.

A restauração dos blocos consistiu na colmatação das fissuras com epóxi seguido de injeção de microcimento, acompanhado da aplicação de concreto em toda a extensão de cada face (GOMES, 2008).

Posteriormente, nas laterais de maior dimensão foram executadas vigas protendidas com 03 cabos de protensão, além de armadura passiva. Houve macaqueamento e troca dos aparelhos de apoio em neoprene. Toda a estrutura recebeu revestimento impermeável para obstruir a umidade e evitar novas expansões (SILVA, 2007; GOMES, 2008).

A Figura 25 evidencia os cabos de protensão dispostos no bloco.



**Figura 25** - Detalhe dos cabos de protensão e armadura passiva



**Fonte:** Gomes, 2008, p. 90

### 2.7.2 Edifício Público

O segundo caso trata-se de um edifício público de 13 pavimentos, construído em 1993 e tendo sido diagnosticado com RAA, do tipo álcali-silicato, em setembro de 2005. Sob o ponto de vista visual, pode ser considerado um dos episódios mais críticos até agora identificados na RMR.

O problema só foi notado graças a uma escavação da fundação para ajuste do projeto arquitetônico, onde se descobriu, em um dos blocos de apoio de um dos pilares externos, fissuras que se propagavam em uma de suas laterais (PECCHIO et al., 2006).

Conforme Silva (2007) esclarece, os profissionais que acompanharam os trabalhos de escavação decidiram não inspecionar todos os blocos. Esta escolha foi feita para rechaçar possíveis suposições inverídicas sobre a estabilidade do prédio, uma vez que, sendo público, a movimentação de pessoas no seu interior era expressiva.

Durante o processo de inspeção, foram constatados distintos aspectos e tipologias de fissuração nos blocos, tais como: intensidade variada e sem orientação preferencial nas superfícies horizontais, fissuras de alta amplitude nas laterais e manifestação de fissuras horizontais ao redor dos blocos, entre outros (PECCHIO et al., 2006). As Figuras 26 e 27 mostram a configuração das fissuras.



**Figura 26** - Bloco de fundação apresentado fissuras na face superior e lateral



**Fonte:** Pecchio et al., 2006, p. 05

**Figura 27** - Bloco fissurado lateralmente



**Fonte:** Pecchio et al., 2006, p. 06

De acordo com as ponderações de Andrade (2014), a laje do pavimento térreo, apoiada nas cintas e nos blocos, limitou a dilatação destes últimos na face superior e na inferior. Assim, essa ação restringente impeliu elevada expansão lateral, que, além de provocar fissuras horizontais, rompeu estribos próximos ao apoio.

Testemunhos foram extraídos e remetidos para análise na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Os resultados da verificação petrográfica mostraram que o agregado graúdo era um milonito de estrutura foliada e orientada, com textura milonítica, havendo quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo fino e quartzo recristalizado (ANDRADE & FIGUERÔA, 2007).

Através de ensaios feitos no microscópio eletrônico de varredura (MEV) - e posteriormente no espectômetro de raios-X por energia dispersiva (EDS) - também foi possível descobrir a presença de borda da reação nos agregados e a ocorrência de gel gretado integrando vazios e poros. Ademais, foi encontrado um teor de álcalis solúveis equivalentes de 0,12 %, o bastante para induzir a RAA (GOMES, 2008).

Em relação aos procedimentos de intervenção, a primeira operação consistiu em preencher as fissuras com resina epóxi, graute e microcimento, mediante o auxílio de purgadores acoplados aos blocos, conforme a Figura 28. A principal dificuldade encontrada foi a de limpar as faces internas das fissuras para certificar a aderência da injeção de microcimento. Adotou-se, a princípio, lavagem pelos purgadores, porém essa escolha não se mostrou adequada. A solução foi abrir furos abaixo das fissuras, com 1", 2" e 3" de diâmetro, para remover o material ali depositado (GOMES, 2008).

**Figura 28** - Detalhe dos purgadores dispostos ao longo de uma das fissuras



Fonte: Silva, 2007, p. 91

A segunda etapa da recuperação foi a definição de qual técnica utilizar no reforço dos blocos de concreto. Optou-se pelo encapsulamento com a inserção de cintas protendidas com barras de dywidag (Figura 29), posicionando-as na parte inferior do bloco - onde ficam as cabeças das estacas e os tirantes dos blocos -, região considerada a mais delicada (ANDRADE, 2014).

**Figura 29** - Aspecto geral do reforço com as barras de dywidag



Fonte: <http://www.ibracon.org.br/eventos/52cbc/FIGUEIROA.pdf>

### 2.7.3 Edifício Comercial

O terceiro e último caso se refere a um edifício comercial construído na década de 1980, concebido em concreto armado e tendo 11 pavimentos. Foi um dos primeiros acontecimentos da RAA em fundações na cidade do Recife.

Conforme Gomes (2008), em agosto de 2005, impulsionado por um vidro aparentemente flambado vizinho a um pilar localizado no pavimento térreo, o engenheiro encarregado intuiu que tal deformação fosse atribuída a recalque de fundação e assim pediu que fosse realizado um acompanhamento periódico daquele elemento estrutural.

Na mesma época da investigação, na Região Metropolitana do Recife, 03 exemplos de obras com fundações deterioradas serviram de parâmetro para o consultor contratado executar a vistoria na infraestrutura do edifício comercial. Foram elas: Edifício



Areia Branca, desmoronado em 2004, e um condomínio próximo, que apresentaram defeitos construtivos semelhantes; e um prédio situado em Jaboatão dos Guararapes, tido como a primeira manifestação da RAA em fundação na RMR (GOMES, 2008).

O mesmo autor relata que a situação dos blocos denunciou um panorama bastante preocupante. A equipe incumbida da escavação encontrou um quadro fissuratório intenso, especialmente pelo número e pela amplitude das fissuras propagadas, que chegavam a mais de 20 mm de abertura, sendo que, em determinadas faces, até espantosos 60 mm.

A Figura 30 salienta a configuração das fissuras encontradas.

**Figura 30** - Aspecto da fissuração encontrada em um dos blocos



Fonte: Gomes, 2008, p. 94

Seguramente, a tipologia das fissuras em forma de “mapa” forneceu provas quase irrefutáveis da ocorrência de RAA, que foi confirmada após os ensaios dos testemunhos retirados e encaminhados à ABCP.

Diante dessa realidade, o plano de restauração dos blocos consistiu, previamente, na injeção das fissuras com microcimento, das quais uma parcela não foi preenchida depois da verificação de corpos de prova posteriormente extraídos (GOMES, 2008).

Em seguida, procedeu-se, de acordo com descrição de Gomes (2008), a colmatação das ligações estaca-bloco empregando material tipo mastique, para impedir o acesso de água que ali se fazia presente, inclusive até inundando alguns blocos. Na parte inferior destes foi aplicado concreto com microsilica e proteção impermeabilizante com aditivo cristalizante.

A solução adotada no reforço dos blocos - protensão com barras tipo dywidag (Figura 31) - se consolidou em decorrência da redistribuição de cargas de dois daqueles elementos a outros, ao mesmo tempo em que fissuras verticais sobrepujaram as bielas de compressão em certos casos. Perfis metálicos duplos (U12'') auxiliaram na fretagem das forças de protensão ao concreto (GOMES, 2008).

A etapa subsequente foi a concretagem das laterais dos blocos. Para tanto, utilizou-se concreto com  $f_{ck} \geq 40$  MPa, com adição de microsilica ao cimento e agregados não reativos. Por fim, se fez uso do mesmo revestimento impermeabilizante supracitado (GOMES, 2008). A Figura 32 representa um bloco após a operação de intervenção.

**Figura 31** - Detalhe da protensão em um dos blocos



Fonte: Gomes, 2008, p. 98

**Figura 32** - Bloco com a recuperação finalizada



Fonte: Gomes, 2008, p. 99

## 2.8 DISCUSSÃO

A reação álcali-agregado caracteriza-se por ser a maior ameaça às estruturas de concreto: é uma doença incurável, preocupante e crônica que merece receber prudência quanto aos seus agentes condicionantes e às variáveis que pesam sobre o seu estabelecimento e progresso.

Para tanto, primeiramente é fundamental conhecer as condições do local da obra, o que inclui, por exemplo, se a disponibilidade de umidade é regular ou não. A partir disso, devem-se adotar critérios de projeto que satisfaçam rigorosamente a interação estrutura-ambiente, valendo-se do emprego de concretos executados sob o princípio da boa engenharia.

Na mesma linha de raciocínio, se não houver intensa fiscalização para saber a procedência dos materiais - principalmente dos agregados - e estes sendo reativos e forem aplicados em obras hidráulicas em contato constante com água, certamente as chances para o desenvolvimento da RAA serão muito maiores. Disso decorre a necessidade de ajustes técnicos, como, neste caso, a do uso de adições minerais e/ou de compostos à base de lítio.

Há que se considerar também a hipótese de a jazida composta por insumos reativos estar próxima à construção, o que facilitaria a logística e diminuiria os custos com transportes e mão-de-obra. Por esses fatores econômicos, muitas vezes é inviável extrair rochas de outras localidades, fazendo com que tais materiais sejam, de fato, utilizados no concreto.

Outra questão importante é a diferença de visão entre pesquisadores sobre o teor de álcalis que alimenta a reação, sendo divergente também daquele estabelecido pela ABNT NBR 15577-1. Isso sugere que, em função dos países possuírem peculiaridades climáticas, distintas quantidades de sódio e potássio podem apressar ou mesmo retardar o surgimento da RAA. Em relação à umidade, o intervalo de valores é consenso, pois mesmo variando a temperatura ela atua no transporte de íons e na formação do gel expansivo.

Uma grande mudança conceitual se deu quando da introdução das teorias formuladas sobre os mecanismos de expansão, cada qual em seu período, as quais trouxeram explicações essenciais de como a microestrutura se comporta frente à formação dos géis.

Quanto aos métodos de investigação, caracterização dos produtos de expansão e monitoramento da reação cabe enfatizar que o setor da construção está bem servido, permitindo chegar a conclusões de modo seguro e coerente. Paralelamente, o grande acervo de ocorrências em diversos países auxiliou esse caminho, o que estimulou avanços no conhecimento dos sintomas mais comuns, entre eles a tipologia das fissuras.

No âmbito das medidas preventivas, nota-se que certas regiões do Brasil são desprovidas de adições minerais, fazendo com que os cimentos lá produzidos não sejam combatentes da reação álcali-agregado. Assim, é necessário que todo território nacional tenha e garanta o uso de tais produtos.

É inegável que reduzir os efeitos de uma estrutura danificada pela RAA demanda intervenção precisa, bem executada, levando sempre em consideração custos excessivos, acessibilidade prejudicada - como é o caso de blocos de fundação ou barragens - e esperados transtornos causados. Se somados, estes itens conduzem, na maioria das situações, a incapacidade de recuperação.

Evidentemente, as soluções paliativas existentes cumprem a importante tarefa de moderar e conter as sequelas deixadas pela reação. No entanto, sabe-se que somente medidas atenuantes não são suficientes para solucionar o problema. Pautado na tecnologia, faz-se necessário perseguir uma saída definitiva para esse impasse.

De maneira geral, presume-se que os casos verificados na Região Metropolitana do Recife podem ter sido o resultado da reatividade dos agregados selecionados de diferentes pedreiras para a fabricação do concreto, que, unido às altas temperaturas anuais e à disponibilidade de umidade daquela região, aceleraram as reações danosas. O local ainda apresenta atmosfera salina, ambiente propício a outros tipos de manifestações patológicas.

À época das construções não houve, efetivamente, nenhum tipo de análise que pudesse conferir o caráter reativo dos agregados. Enfatiza-se que a ABNT NBR 15577 não existia e o acesso a documentos técnicos existentes era limitado ou até rejeitado. Aquele contexto não se beneficiou de todo o progresso dos estudos sobre durabilidade ofertado atualmente, uma vez que a norma de concreto vigente não contemplava esse conceito.

Até o singular diagnóstico da Ponte Paulo Guerra não havia registros no mundo da presença da RAA em blocos de concreto. Por assim dizer, os acontecimentos na RMR modificaram a assimilação que se tinha, trazendo novas reflexões e impondo desafios constantes à cadeia construtiva.

As contínuas confirmações pós-Paulo Guerra proporcionaram um enorme aprendizado e consciência da gravidade do problema na região, o que simbolizou lições permanentes mesmo vindas através de desconfortos e prejuízos.

Desse modo, pode-se assegurar que a engenharia pernambucana, no decorrer da última década, tornou-se uma das mais desenvolvidas do país, já que promoveu, baseado também em outros episódios, uma profunda colaboração aos profissionais brasileiros e

mundiais do setor, para que observassem com maior cautela tais elementos de fundação, bem como outros componentes estruturais.

Cumpre-se alertar que outras cidades brasileiras com as mesmas características ambientais e geológicas da RMR poderão manifestar a reação álcali-agregado em qualquer momento de sua história, em se tratando da falta de controle durante alguma etapa da obra, desde o planejamento até a manutenção preventiva e sistemática.



### 3. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

#### 3.1 CONCLUSÃO

Tendo em vista os conceitos abordados na revisão de literatura, que forneceram fundamentos indispensáveis à interpretação da questão, e a apresentação de três exemplos reais ocorridos em blocos de concreto de fundações recifenses, conclui-se que o objetivo proposto foi alcançado.

Buscou-se retratar a reação álcali-agregado sob o instigante ângulo dos seus princípios regentes para fornecer elementos que pudessem transitar por sua complexidade e seus traços particulares de manifestação.

Por se tratar de um assunto tão múltiplo e exigente, de competência da Engenharia Civil, percebe-se a necessidade de seu domínio pelos profissionais do setor. E, como é notório, o vasto campo de atuação do engenheiro civil estende-se a concepção, projeto, tecnologia do concreto, gerenciamento e execução de obras e manutenção das edificações, fatores diretamente relacionados à RAA.

É nesse propósito que esta monografia se enquadrou. Um tema fascinante, controlado por variáveis distintas e ainda desconhecido por alguns do meio precisa ser estudado com mais atenção. Isso traduziu, no trabalho, em medidas de profilaxia, controle e diagnóstico da reação, contribuindo para uma melhor percepção do acontecimento na prática.

Mesmo depois de mais de 70 anos da sua primeira menção, existem algumas lacunas a serem exploradas sobre a RAA, destacando-se, como abordado, a maneira de interromper o problema sempre que seu progresso estiver em andamento. Na atualidade, esse obstáculo é a principal incógnita dos especialistas da área.

No futuro, com o já conquistado avanço importante no conhecimento da ciência e desenvolvimento dos materiais, e amparado pela consolidação do conceito de durabilidade das estruturas, espera-se haver a resolução total para um dos mais instigantes mecanismos de degradação do concreto.

### 3.2 SUGESTÕES

Como sugestões para equacionar o problema levantado no trabalho, propõem-se:

- Introduzir a disciplina Patologia e Terapia das Construções na graduação em Engenharia Civil de todas as instituições brasileiras, da qual se transmitiria, além de outras questões pertinentes, a importância do estudo da RAA de modo holístico;
- Difundir de forma abrangente o conhecimento sobre o tema na comunidade técnica brasileira por meio de palestras, simpósios, congressos e conferências. Salienta-se que o Brasil sediará, em 2016, o XV ICAAR (International Conference on Alkali-Aggregate Reaction), na cidade de São Paulo;
- Aumentar a contribuição nacional referente a publicações de artigos sobre a reação álcali-agregado, embora o país esteja situado em um patamar de destaque no assunto no Hemisfério Sul;
- Promover parcerias entre empresas privadas e universidades no intuito de incentivar pesquisas de ponta para o desenvolvimento de materiais em escala nanotecnológica, condição esta que pode trazer a cura definitiva para as estruturas com RAA;
- Fazer bom uso das normas técnicas vigentes e das boas práticas de engenharia;
- Possibilitar, através de estudos de logística e oferta, ampla integração e distribuição de sílica ativa, escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e cinza de casca de arroz aos produtores de cimento e concreto de todo o território nacional;
- Intensificar a utilização de concretos e cimentos compostos com adições minerais;
- Monitorar rigorosamente a potencial reatividade dos agregados graúdo e miúdo antes de serem usados na produção do concreto, tendo em vista a necessidade de adequação dos outros fatores condicionantes do fenômeno se o resultado da análise for positivo;
- Conscientizar o poder público e a população da necessidade de avaliação de edificações e obras de arte que utilizaram insumos potencializadores da RAA, quando existe a possibilidade de consulta às informações relativas ao projeto e execução destas construções, principalmente em localidades em que a reação já ocorreu, a exemplo da Região Metropolitana do Recife.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T.; FIGUEIRÔA, 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.

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 ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 13p.

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.

ANDRIOLO, F. R. Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da reação álcali-agregado. In: I SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 1997. 25p.

ANDRIOLO, F. R. Proposições para conservação de estruturas afetadas pela reação álcali-agregado. In: I SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 1997. 13p.

ARRAIS, M. S. M. C. **Reação álcali-silicato: Avaliação do comportamento de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimento.** 2011. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 11 p.

BATISTA, D.G. **Investigação da deterioração de concretos de UHEs por reações com os agregados.** 2013. 310 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

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

CARDOSO, A. F. A. **Reação Álcali-Agregado - Verificação da reatividade do seixo, frente ao álcalis do cimento, das principais jazidas fornecedoras de agregado graúdo para a região metropolitana de Belém.** 2008. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

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).

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.

DAHER, C. H. S.. **Avaliação do grau de influência de parâmetros de contorno no ensaio de reatividade potencial álcali-agregado pelo método acelerado.** 2009. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

DAL MOLIN, D. C. C.; HASPARYK, N. P.; MONTEIRO, P. J. M. Avaliação das propriedades mecânicas e análise da microestrutura de concretos afetados pela RAA da UHE Furnas *In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 15p.

DAL MOLIN, D. C. C.; PAULON, V. A.; VALDUGA, L. Levantamento da Reatividade Potencial de Basaltos no Brasil. *In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 11p.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas experimentais para estudo da microestrutura. *In: ISAIA, G. C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.* São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 14. p. 405-438

DECHICHI, M. **Reação Álcali-Agregado: Estudo das propriedades elásticas e mecânicas através da utilização de inibidores.** 1998. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

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.

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.

HASPARYK, N.P. **Investigação de concretos afetados pela Reação Álcali-Agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** 2005. 326 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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.

HELENE, P.R.L.; MEDEIROS, M.H.F. **Estudo da influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. 65 p. (Relatório Técnico).

HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F.; CASTRO, P. AAR in brazilian bridge foudations - 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.

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.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MIZUMOTO, C. **Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes.** 2009. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

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.

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.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 738 p. Tradução de: Salvador E. Giammusso.

NOGUEIRA, K. A. **Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008**. 2010. 93 p. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

PECCHIO, M.; ANDRADE, T.; SILVA, J. J. R. S.; ALMEIDA, R.; PATROCINIO, J.; KIHARA, Y. Diagnóstico de reação álcali-agregado em blocos de fundação de um edifício público situado na cidade de Recife/PE. *In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 15p.

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.

PREZZI, M.; MONTEIRO, P. J. M.; SPOSITO, G. Alkali-silica reaction, Part 1: use of the double layer theory to explain the behaviour of reaction-product gels. **ACI Materials Journal**, v.94, n.1, p.10-17, 1997.

PRISZKULNIK, S. Compostos de lítio e silanos no tratamento de estruturas afetadas pela reação álcali-agregado - revisão bibliográfica. *In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 15p.

RODRIGUES, E. C. **Análise numérica do efeito de fatores influentes da reação álcali-agregado no desempenho de estruturas de concreto**. 2012. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

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.

SALLES, F. M. S.; KUPERMAN, S. C.; BERTOLUCCI, L. D. V. Ensaio acelerado para verificação da RAA em prismas de concreto. *In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO*, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 13p.

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos.** 2008. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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.

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.

SILVA, G. A. **Recuperação de blocos de coroamento afetados pela reação álcali-agregado.** 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2007.

SILVA, M. G. Cimentos Portland com adições minerais. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo: IBRACON, 2010. Cap. 25. p. 791-823.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TIECHER, F.; VENQUIARUTO, S.; DAL MOLIN, D. C. C.; SILVA, L. B. Avaliação da utilização do cimento de alta resistência inicial e resistente a sulfatos no combate à reação álcali-agregado. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** . São Paulo: IBRACON, 2006. 11p.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-sílica e penetração de cloretos.** 2011. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado - mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo.** 2002. 225 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.