

## **Monografia**

# **"REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: DIRETRIZES E REQUISITOS DA ABNT NBR 15577/2008"**

Autor: Kelso Antunes Nogueira

Orientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

Fevereiro/2010

KELSO ANTUNES NOGUEIRA

**"REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: DIRETRIZES E REQUISITOS DA  
ABNT NBR 15577/2008"**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil  
da Escola de Engenharia UFMG

Ênfase: **Gestão e Tecnologia na Construção Civil**

Orientador: Prof. Dr. Abdias Magalhães Gomes

Belo Horizonte

A Deus pela vida e pela saúde.

Aos meus pais, fonte inesgotável de incentivo e apoio, que me ensinaram, por meio de atitudes e do próprio exemplo, que o estudo e a persistência valem a pena e juntos.

À Fabíola, minha futura esposa pelo carinho e incentivo permanentes.

Aos meus irmãos, familiares e amigos.

### **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu forças e sabedoria para romper as barreiras e concluir essa etapa.

Ao orientador, Prof. Abdias Magalhães Gomes, Dr., pelo apoio e atenção dispensados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores que atuaram ao longo da especialização, obrigado pela transmissão do conhecimento.

Aos colegas do curso, pelas experiências compartilhadas e enriquecedoras.

## RESUMO

A reação álcali-agregado é uma das manifestações patológicas de maior grau de deterioração do concreto, principalmente em obras de infra-estrutura, barragens e pontes. Os principais fatores que influenciam a reação provêm de processos químicos, entre alguns dos compostos mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos originários do cimento, água de amassamento e agentes externos, os quais estão dissolvidos na solução dos poros do concreto.

Essa reação, apesar de lenta, conduz a um quadro patológico irreversível, gera produtos expansivos capazes de microfissurar o concreto, causando a perda de homogeneidade, de resistência mecânica e de durabilidade.

Apesar de existirem formas eficientes de evitar que a RAA se desenvolva do ponto de vista preventivo, após a instalação do processo deletério, os danos causados são irreversíveis e as soluções de recuperação ainda são paliativas.

Diante do exposto, e dado o grande número de obras afetadas pela RAA, o presente trabalho buscou, através de pesquisas abordar o histórico da reação no Brasil e no mundo, os tipos de reações existentes, a química e as condições para a ocorrência, as medidas preventivas, como: métodos para a detecção e mitigação, que podem ser tomadas para se evitar a instauração do processo de deterioração por RAA e as diretrizes preconizadas pelas normas Brasileiras, a fim de se entender todos os intervenientes que envolvem a anomalia e as medidas para evitá-la, levando em consideração as prescrições da ABNT NBR 15577/2008.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1. Thomas Stanton, precursor dos estudos de RAA .....   | 6  |
| Figura 3.2. Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA (Pecchio et al., 2006) .....  | 9  |
| Figura 3.3. Bloco de fundação de edificação residencial com 9 anos de idade (ANDRADE et al., 2006) .....   | 10 |
| Figura 3.4. Diagramas esquemáticos das transformações químicas da reação álcali-silica (WANG; GILLOTT, 1991) .....   | 11 |
| Figura 3.5. Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento (PAULON, 1981) .....  | 12 |
| Figura 3.6. Ataque dos íons OH <sup>-</sup> ao grupo silanol (HASPARYK, 1999).....   | 13 |
| Figura 3.7. Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (HASPARYK, 1999) .....  | 13 |
| Figura 3.8. Características do agregado antes (a) e depois da reação (b) (VAN AARDT; VISSER, 1977). .....  | 16 |
| Figura 3.9. Representação química do ataque das hidroxilas à sílica (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981) .....  | 19 |
| Figura 3.10. Representação química da RAA até a formação do gel álcali-silica exercendo pressão sobre a pasta ou agregado, por absorver água (COLLINS et al., 2004)..... | 20 |
| Figura 3.11. Relação entre o consumo de cimento no concreto e o equivalente alcalino do cimento (FURNAS, 1997) .....   | 24 |
| Figura 3.12. Moldes e sistema de leituras empregados no método CPT (SANCHEZ (2008) .....   | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.13. Análise comparativa entre os métodos dos prismas de concreto (1 ano) e o método acelerado brasileiro de prismas de concreto (1 mês) (SANCHEZ, 2008) ..... | 42 |
| Figura 4.1. Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (ABNT NBR 15577-1/2008) .....  | 52 |
| Figura 4.2. Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado .....   | 56 |
| Figura 4.3. Fluxograma da avaliação da eficiência de materiais inibidores da reação .....  | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1. Estruturas de concreto no Brasil afetadas pela reação álcali-agregado.....  | 8  |
| Tabela 3.2. Adaptações do método acelerado das barras quanto aos limites de expansão e tempo adotados em diferentes países (BELLEW, 1997) ..... | 37 |
| Tabela 3.3. Especificações de pesquisadores para o método dos prismas acelerado (FOURNIER et al, 2004).....                                     | 41 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 3.1. Relação de rochas e minerais susceptíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis (NBR 15577-3, 2008).....   | 27 |
| Quadro 3.2. Principais tipos de agregados reativos com os álcalis do cimento Portland (SABBAG, 2003) .....  | 28 |
| Quadro 3.3. Limites de fases reativas, presentes no agregado, sugeridas na NBR 15577-3, para classificá-lo como potencialmente inócuo frente à RAS.....                             | 33 |
| Quadro 3.4. Teores de minerais / pozolânicas empregados para inibição da RAA, empregados em substituição do cimento e na presença de aditivos plastificantes. (HASPARYK, 2005)..... | 49 |
| Quadro 4.1. Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição (ABNT, 2008).....                                  | 54 |
| Quadro 4.2: Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado (ABNT NBR 15577/2008) .....  | 59 |
| Quadro 4.3. Granulometria requerida do material para ensaio (ABNT NBR 15577-4/2008) .....   | 60 |
| Quadro 4.4. Granulometria requerida do agregado graúdo (ABNT 2008).....   | 63 |
| Quadro 4.5. Medidas de mitigação (ABNT 2008) .....  | 65 |
| Quadro 4.6. Materiais inibidores da reação álcali-agregado (ABNT 2008).....   | 65 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                               | 1  |
| 2. OBJETIVO.....                                 | 3  |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                   | 4  |
| 3.1 A reação álcali-agregado .....               | 4  |
| 3.2 A reação álcali-agregado histórico.....      | 5  |
| 3.3 A reação álcali-agregado no Brasil .....     | 7  |
| 3.4 Tipos de reações álcali-agregado .....       | 10 |
| 3.4.1 Reação álcali-sílica .....                 | 10 |
| 3.4.2 Reação álcali-silicato .....               | 14 |
| 3.4.3 Reação álcali-carbonato .....              | 16 |
| 3.5 Química da reação álcali-agregado .....      | 18 |
| 3.6 Condições para ocorrência da reação .....    | 22 |
| 3.6.1 Concentração de hidróxidos alcalinos ..... | 23 |
| 3.6.2 Agregados reativos .....                   | 25 |
| 3.6.3 Umidade.....                               | 29 |
| 3.6.4 Temperatura .....                          | 30 |
| 3.6.5 Tempo.....                                 | 31 |

|   |    |
|---|----|
| 3.7 Metodologia para detecção da reação álcali-agregado .....   | 31 |
| 3.7.1 Análise petrográfica .....  | 32 |
| 3.7.2 Microscopia eletrônica de varredura .....   | 34 |
| 3.7.3 Método Acelerado das Barras de Argamassa.....   | 35 |
| 3.7.4 Método das Barras de Argamassa (MBT).....   | 37 |
| 3.7.5 Método para avaliar combinação agregado/material cimentício .....                                   | 38 |
| 3.7.6 Método dos prismas de concreto .....  | 39 |
| 3.7.7 Método acelerado dos prismas de concreto .....  | 41 |
| 3.7.8 Método Osipov.....  | 43 |
| 3.7.9 Método Químico.....   | 43 |
| 3.8 Métodos para mitigação da reação álcali-agregado .....  | 44 |
| 3.8.1 Adições químicas.....   | 44 |
| 3.8.2 Adições minerais.....   | 46 |
| 4. DIRETRIZES NORMATIVAS (ABNT NBR 15577/2008), PARA A ANÁLISE DA<br>MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA .....        | 51 |
| 4.1 Análise de risco.....   | 51 |
| 4.2 Avaliação da reatividade do agregado.....   | 55 |
| 4.3 Análise petrográfica do agregado ABNT NBR 15577-3.....  | 56 |
| 4.4 Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado -<br>ABNT NBR 15577-4.....      | 59 |
| 4.5 Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método de longa duração<br>ABNT NBR 15577-6..... | 62 |
| 4.6 Medidas de mitigação .....  | 64 |
| 4.6.1 Requisitos .....  | 64 |
| 4.6.2. Avaliação da eficiência de materiais inibidores.....   | 66 |
| 4.6.2.1. Ensaio acelerado para confirmação da mitigação de reação .....                                   | 66 |
| 4.6.2.2. Ensaio de longa duração .....  | 66 |

|  |    |
|--|----|
| 4.7 Análise final das informações obtidas na ABNT 15577/2008 ..... | 68 |
| 5. CONCLUSÃO .....   | 69 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                    | 70 |

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto atualmente é considerado um dos materiais mais utilizados no mundo, principalmente no Brasil, pela abundância de insumos para a sua preparação, facilidade de manuseio e pelo baixo custo se comparado a outros materiais de construção. No entanto, a durabilidade das estruturas em concreto está diretamente ligada aos materiais, processos construtivos, às propriedades físicas e químicas, aos tipos de solicitações e às condições de exposição. Portanto, vários, podem ser os processos de deterioração deste material, provenientes de causas físicas e químicas, dentre os quais, destacam-se a corrosão das armaduras, a ação gelo-degelo, o ataque por sulfatos e a reação álcali-agregado (RAA), entre outros.

A RAA ocorre devido ao processo químico que provém da reação de alguns dos compostos mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos originários do cimento, água de amassamento e agentes externos, os quais estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. Essa reação resulta no surgimento de expansões, com ou sem formação de gel, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência física e química e conseqüente ruptura da estrutura.

A reação álcali-agregado é uma das manifestações patológicas de maior grau de deterioração do concreto e de enorme dificuldade de recuperação, principalmente em obras de barragens, fatores que a levaram a ser objeto de pesquisa mais aprofundado visando, entre os outros tópicos, as questões de segurança e durabilidade.

Por ser uma reação lenta, a prevenção é a forma mais eficiente de se evitar a RAA, pois o comportamento da reação em longo prazo ainda não é plenamente conhecido, embora existam vários anos de pesquisa no mundo inteiro.

Diante do exposto, e dado o grande número de obras afetadas pela RAA, presente trabalho buscará, através de pesquisas abordar o histórico da reação no Brasil e no mundo, os tipos de reações existentes, a química e as condições para a ocorrência, as medidas preventivas, como: métodos para a detecção e mitigação, que podem ser tomadas para se evitar a instauração do processo de deterioração por RAA e as diretrizes e requisitos preconizados pelas normas Brasileiras.

A fim de se entender todos os intervenientes que envolvem a anomalia e as medidas para evitá-la, levando em consideração as prescrições da ABNT NBR 15577/2008, para avaliar aspectos como a análise do tipo da estrutura e sua condição de exposição ambiental, restrições quanto a utilização de agregados, ensaios dos materiais e avaliação da eficiência das medidas mitigadoras da expansão, no intuito de minimizar o potencial da estrutura vir a apresentar manifestações patológicas deletérias devidas à reação álcali-agregado.

## 2. OBJETIVO

Devido ao grande número de obras de construção civil afetadas pela reação álcali-agregado, principalmente hidráulicas esta pesquisa tem como objetivo, desenvolver uma revisão bibliográfica sobre o histórico da reação no Brasil e no mundo, os tipos de reações existentes, a química e as condições para a ocorrência, as medidas preventivas, como: métodos para a detecção e mitigação, que podem ser tomadas para se evitar a instauração do processo de deterioração por RAA.

Aliado aos itens acima relacionados, identificar os requisitos estabelecidos pelas normas Brasileiras, a fim de se entender todos os intervenientes que envolvem a anomalia e as medidas para evitá-la, levando em consideração as prescrições da ABNT NBR 15577/2008, e avaliar aspectos como a análise do tipo de estrutura e sua condição de exposição ambiental, restrições quanto à utilização de agregados, ensaios dos materiais e avaliação da eficiência das medidas mitigadoras da expansão, no intuito de minimizar o potencial da estrutura vir a apresentar manifestações patológicas deletérias devidas à reação álcali-agregado, enfim, avaliar as condições impostas pela norma, de modo a inibir o surgimento da patologia.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. A Reação Álcali-agregado**

A reação álcali-agregado (RAA) é a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto entre os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, da água de amassamento, de aditivos químicos, de adições pozolânicas, entre outros.) e alguns tipos de minerais presentes nos agregados. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto.

A reação álcali-agregado foi estudada inicialmente por Stanton, em 1940, na Califórnia, quando identificou este processo como sendo uma reação deletéria que ocorria entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis do cimento, o qual denominou reação álcali-agregado. Segundo Stanton em constatações experimentais, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causar expansão e fissurações; Tais fatos puderam ser observados em diversas estruturas reais afetadas na Califórnia, durante os anos 1920 a 1930 (STANTON, 1940).

Após a descoberta da RAA, vários autores passaram a estudar os mecanismos de expansão da RAA, tais como Hansen (1940), Vivian (1952), Van Aardt e Visser (1977), Dent Glasser e Kataoka (1981), Deng e Tang (1993), Prezzi, Monteiro e Sposito (1997), Hasparyk (1999) entre outros. Estudos que contribuíram para o esclarecimento de fatores intervenientes, tais como: o processo químico envolvido, a identificação dos minerais

reativos, as conseqüências, a partir da identificação de casos reais de estruturas afetadas por esta patologia.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer o concreto, resultando em perda de resistência, elasticidade e durabilidade.

A possibilidade de ocorrência da RAA está condicionada à interação entre a quantidade de álcalis disponíveis e a potencialidade reativa dos agregados. Entretanto, segundo Biczok, *et al.*, (1972), influências externas como a umidade e temperatura são condicionantes importantes do processo deletério.

O tempo necessário para notar indícios da RAA ou danos em uma estrutura depende de vários fatores, destacando-se o tipo e proporção dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel, a temperatura e a umidade, entre outros fatores (BICZOK, *ET AL.*, 1972).

A RAA pode ser classificada, em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido, de três formas, como: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato ou reação álcali-carbonato (HOBBS, 1988).

### **3.2. A Reação álcali-agregado histórico**

A reação álcali-agregado foi descoberta na Califórnia, na década de 30, causando preocupação ao meio técnico, pois nessa época foram observadas fissuras e expansões em estruturas de concreto.

Os primeiros estudos foram publicados por Stanton (1940). Este realizou um estudo e concluiu que a causa das fissuras e expansões do concreto na Califórnia, foram causadas

por uma reação originada pelos hidróxidos alcalinos liberados pelo cimento e pela sílica proveniente de certos agregados, fato que despertou o interesse de pesquisadores, dando início a várias pesquisas sobre o tema (SANCHEZ, 2008). A Figura 3.1 abaixo ilustra alguns casos demonstrados por Stanton.



Figura 3.1. Thomas Stanton, precursor dos estudos de RAA. Califórnia Departamento of Transportation *apud* MEHTA e MONTEIRO (2008).

A primeira teoria para explicar o mecanismo de expansão do gel, nomeada de pressão osmótica, foi elaborada por Hansen, em 1944, nela, hipoteticamente, produtos da reação ficavam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual, devido a pressões hidráulicas, causava expansão na estrutura de concreto (PAULON, 1981).

No período entre 1950 e 1960 o estudo desse fenômeno perdeu forças, retornando as pesquisas sobre o assunto de forma mais rigorosa na década de 70, quando foram surgindo relatos das anomalias em diversos países. Baseando-se nesses relatos e com o intuito de entender as causas, várias pesquisas e ensaios sobre o tema, se iniciaram.

No mundo, foram diagnosticadas várias estruturas afetadas, desde a descoberta da RAA, podendo ser citados como exemplos a barragem Val de La Mare (Reino Unido), a barragem de Sandouping (China), a barragem La Tuque (Canadá), a barragem Kouga (África do Sul), a barragem Chambon (França), trechos da via urbana de Johannesburg (África do Sul) e trechos da via expressa Hanshin (Japão) (SILVEIRA *et al.*, 2006).

### **3.3. A reação álcali-agregado no Brasil**

Kihara (1993) menciona que os primeiros trabalhos sobre RAA no Brasil são da década de 60, com a construção da Barragem de Jupia, cujo cascalho do Rio Paraná tinha a fase reativa calcedônia. Para viabilizar a utilização desse agregado, construiu-se no canteiro de obras de Jupia uma fábrica de pozolana a partir da argila caulinitica disponível na região, que após calcinação era adicionada ao cimento Portland no teor de 35%.

Segundo Hasparyk (1999), existem mais de 20 casos confirmados de barragens afetadas por esta reação no Brasil, dentre eles encontram-se a barragem Apolônio Sales, localizada na divisa entre a Bahia e Alagoas; as barragens de Billings/Pedras, situadas no estado de São Paulo; as barragens de Furnas, em Minas Gerais e a barragem Joanes, no estado da Bahia.

A Tabela 3.1 apresenta as estruturas afetadas pela RAA no Brasil.

Tabela 3.1. Estruturas de concreto no Brasil afetadas pela reação álcali-agregado.

| 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).

A divulgação do primeiro caso em barragem se deu em 1985, na Usina Hidroelétrica Apolônio Sales de Oliveira (Moxotó). Em 1988 foi confirmada a presença de reação na Barragem de Joanes II (BA). Na década de 90 constatou-se em várias barragens a ocorrência de RAA e, em todos os casos investigados a reação era do tipo álcali-silicato.

Na cidade do Recife, Foi realizado um extenso trabalho de investigação na Ponte Paulo Guerra detectando-se, dentre outras anomalias, a deterioração agressiva em blocos de fundação, pela reação álcali-agregado (ANDRADE *et al.*, 2006).

A Figura 3.2 ilustra as anomalias em blocos de fundação (PECCHIO *et al.*, 2006).



Figura 3.2. Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA (Pecchio et al., 2006).

Em 2005, constatou-se a ocorrência da anomalia em blocos de fundações em edifícios urbanos, na cidade de Recife/PE, em escala inédita para o meio técnico de todo o mundo. As principais características eram: baixa profundidade do lençol freático, presença de fases reativas nos agregados (quartzo com extinção ondulante e quartzo microgranular) e disponibilidade de álcalis.

Aproximadamente 20 casos de elementos de fundação com reação álcali-agregado foram descobertos na região metropolitana de Recife com idade entre três e 30 anos (ANDRADE *et al.*, 2006). A Figura 3.3 ilustra os aspectos deletérios da reação álcali-agregado.



Figura 3.3. Bloco de fundação de edificação residencial com 9 anos de idade (ANDRADE *et al.*, 2006).

O potencial de reatividade dos agregados miúdos e graúdos da Região Metropolitana do Recife foram avaliados por Andrade *et al.*, (2006), e concluíram que a maioria dos agregados analisados apresentava fases potencialmente reativas que efetivamente contribuíram para a ocorrência da reação, principalmente nos blocos de fundação.

### **3.4. Tipos de Reação Álcali-agregado**

#### **3.4.1. Reação álcali-sílica**

É o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do  $\text{Ca(OH)}_2$  (hidróxido de cálcio) originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo (NBR 15577-1, 2008).

Reações do tipo álcali-sílica são reações expansivas mais conhecidas e registradas no mundo (KIHARA, 1993).

De acordo com Diamond (1975), a reação álcali-sílica é mais comum do que a reação álcali-silicato e álcali-carbonato, sendo universalmente considerada como a reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados.

Como exemplo de minerais com forma desordenada que dão um caráter reativo à sílica, pode-se citar: opala ou sílica amorfa, calcedônia (variedade de quartzo fibroso ou criptocristalino), cristobalita e tridimita (formas cristalizadas metaestáveis de sílica), vidros naturais ou vulcânicos (depósitos piroclásticos ou rochas vulcânicas) e os vidros artificiais (pyrex), (HASPARYK, 1999).

Wang e Gillott (1991) descrevem as transformações químicas da reação álcali-sílica até a formação do gel expansivo, conforme a Figura 3.4. Afirmando que o grupo silanol (SiOH), presente na superfície da sílica (Figura 3.4 (a)), é atacado pelos álcalis Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e/ou Ca<sup>++</sup> (Figura 3.4 (b)), havendo a troca do Ca<sup>++</sup> por prótons desse grupo e uma associação do Na<sup>+</sup> e do K<sup>+</sup> aos íons H<sup>-</sup>. A seguinte etapa do processo de expansão do gel da reação álcali-sílica acontece à quebra das ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) pela ação dos íons hidróxidos (NaOH e KOH), surgindo um grupo silanol na estrutura interna da sílica (Figura 3.4 (c)), acarretando a formação de um gel sílico-alcalino através da difusão de íons alcalinos internamente (Figura 3.4 (d)).

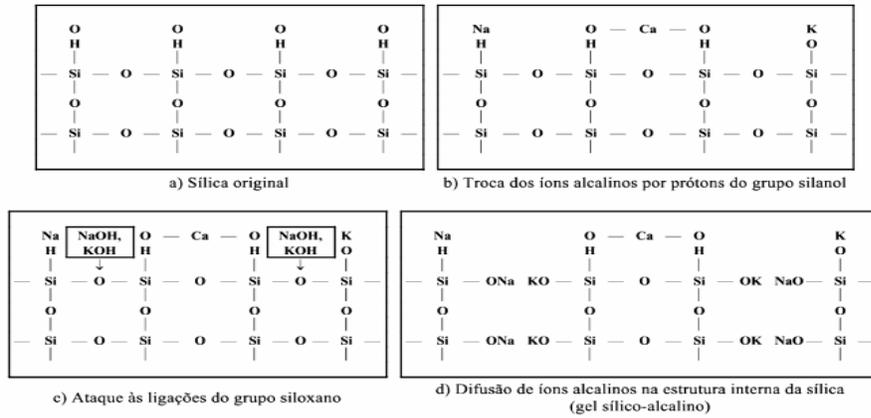


Figura 3.4. Diagramas esquemáticos das transformações químicas da reação álcali-sílica (WANG; GILLOTT, 1991).

De acordo com Paulon, (1981), normalmente há exsudação do gel na superfície do concreto, na reação álcali-sílica, o qual é composto basicamente de sílica e álcalis. O gel formado pela reação possui estrutura interna isotrópica, podendo se tornar algumas vezes anisotrópica, devido à cristalização parcial ou à presença de pequenas inclusões.

A Figura 3.5 mostra o mecanismo de reação álcali-sílica.

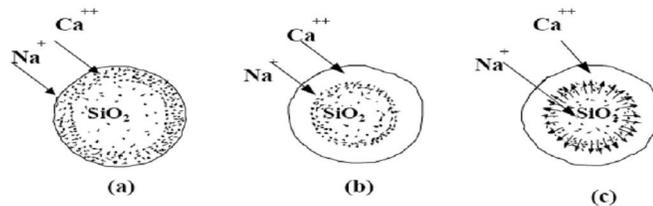


Figura 3.5. Partícula de sílica reativa envolta com pasta de cimento (PAULON, 1981).

Na fase inicial, (Figura 3.5.(a)) nota-se a partícula de sílica reativa circundada por íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  contidos na pasta de cimento em solução básica. Na segunda fase, devido à alta concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na pasta, forma-se, a uma fina camada de um gel de cal-álcali-sílica (Figura 3.5.(b)), de caráter não expansivo ao redor da sílica. Essa fase é inócua.

Na fase seguinte, (Figura 3.5.(c)), os íons de cálcio e sódio penetram na membrana semipermeável, onde reagirão com a sílica. Esta reação é considerada inócua se a concentração de cálcio for alta o suficiente para assegurar a contínua formação do gel não-expansivo, uma vez que há o consumo de álcalis durante a reação, havendo uma redução na concentração alcalina. Porém, se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que em presença de água, se expandirá e ocasionará fissuras quando as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento. Estas expansões cessarão somente quando os álcalis ou a sílica reativa forem consumidos.

Outro mecanismo que explica este tipo de reação é a ocorrência de um ataque ao grupo silanol (SiOH) pelos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) através de uma reação ácido-base. Posteriormente, há um equilíbrio entre os cátions  $\text{Na}^+$  e os ânions de oxigênio  $\text{O}^{2-}$ , formando assim o gel sílico alcalino, conforme Figura 3.6.

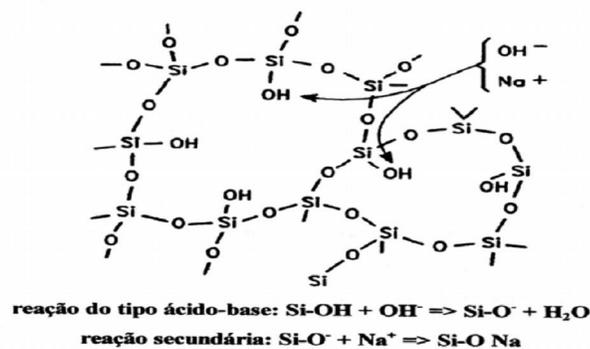


Figura 3.6. Ataque dos íons  $\text{OH}^-$  ao grupo silanol (HASPARYK, 1999).

A segunda etapa da reação, demonstrada na Figura 3.7, se dá pelo ataque dos íons hidroxilas ao grupo siloxano, gerando os monômeros silicatos ( $\text{H}_2\text{SiO}_4$ ), que permitem a absorção de água e de íons alcalinos, resultando em expansão, fissuração, exsudação de gel e deterioração da estrutura, (HASPARYK, 1999).

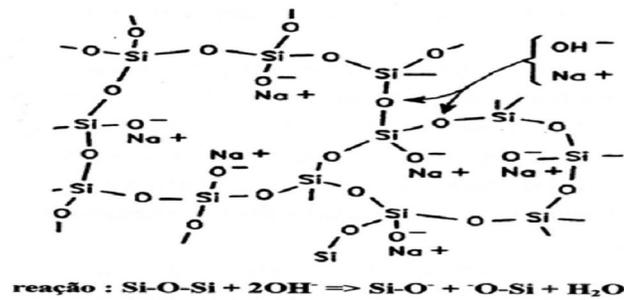


Figura 3.7. Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (HASPARYK, 1999).

Em função de grande parte das rochas utilizadas como agregados no concreto possuírem sílica, é, portanto a reação mais comum, e por esse motivo, a maioria dos estudos publicados, se direcionam a reação álcali-sílica (MONTEIRO, 2001).

### 3.4.2. Reação álcali-silicato

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, dentre outros (NBR 15577-1, 2008).

A reação álcali-silicato é da mesma natureza da reação álcali-sílica, porém mais lenta, e é responsável na maioria dos casos pela deterioração de estruturas de concreto no Brasil. Essa reação se dá entre os álcalis disponíveis do cimento com os silicatos presentes em rochas sedimentares, metamórficas e ígneas, sendo a presença do quartzo tensionado ou minerais expansivos do grupo dos filossilicatos como os principais elementos para ocasionar a reação (KIHARA, 1986).

Furnas (1997) verificou que, na reação álcali-silicato os minerais reativos, normalmente, têm retículo cristalino deformado. O quartzo está entre esses minerais, pois devido a

tensões de origem geológica, na maioria das vezes apresenta o retículo cristalino deformado, sendo que a deformação do quartzo reflete-se sob a forma de extinção ondulante.

A presença de quartzo microcristalino também potencializa a reação, além da presença de cristais de silicatos deformados. A reação, devido à presença de quartzo microcristalino e de quartzo deformado resultam em expansões mais lentas do que as causadas pela reação álcali-sílica (WIGUM, 1995).

Rochas que apresentam quartzo com ângulo de extinção ondulante não necessariamente serão reativas. A reatividade depende de outros fatores aliados, tais como a textura e o tamanho dos grãos (AMO; PÉREZ, 2001).

Em todos os casos de reação álcali-silicato, a entrada e saída de água são essenciais para o mecanismo de expansão, sendo que a estrutura da rocha tem uma influência considerável no mecanismo, na proporção e no grau de expansão, pois muitas vezes os minerais isolados são componentes expansivos (Gillott, 1986).

Analisando a reatividade de agregados contendo feldspato, Van Aardt e Visser (1977), propuseram uma teoria chamada "Solution Theory", para explicar a reação álcali-silicato. De acordo com essa teoria, nas fases iniciais do concreto origina-se uma camada de aderência ao redor do agregado composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) mais hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou CH). No decorrer do tempo e na presença de umidade, o CH (proveniente da hidratação do cimento) reagirá com o feldspato.

Outra forma de ocorrer à reação seria através da penetração de cal no agregado, liberando álcalis sob forma de KOH, NaOH e/ou silicatos de potássio e sódio na forma de gel parcialmente solúvel em água. Devido à concentração de álcalis, os silicatos de cálcio (responsáveis pela aderência) se dissolverão em silicatos de potássio e sódio, formando um vidro ou gel composto por Ca, Na, K e sílica ao redor e internamente, às vezes, ao

agregado. O vidro ou gel é um péssimo elemento da ligação, uma vez que ele é parcialmente solúvel em água e pode se expandir ou se contrair devido ao ganho ou a perda de água. Neste caso existirá uma parte do agregado envolvido pelo vidro ou gel semilíquido de baixa resistência. A figura 3.8 representa o agregado antes (a), e depois (b), da reação.

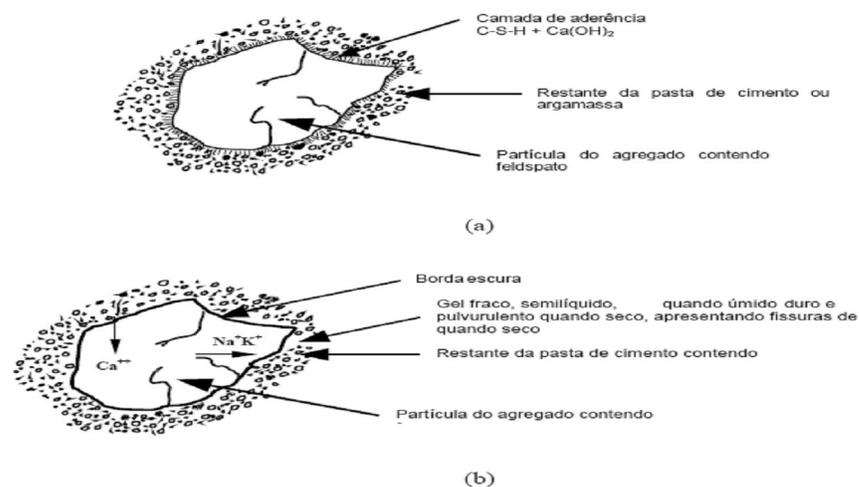


Figura 3.8. Características do agregado antes (a) e depois da reação (b) (VAN AARDT; VISSER, 1977).

De acordo com Valduga (2002), a reação álcali-silicato é a mais encontrada no Brasil, sendo que as barragens que apresentam esse tipo de reação no país foram construídas com agregados provenientes de quartzitos, granitos, e gnaisses.

### 3.4.3. Reação álcali-carbonato

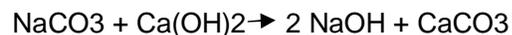
De acordo com Paulon (1981), a reação álcali-carbonato ocorre de forma totalmente diferente das reações álcali-silica e álcali-silicato. Este tipo de reação ocorre devido à expansão das rochas carbonáticas, calcários dolomíticos argilosos, a partir do ataque dos

álcalis do cimento ao calcário dolomítico, formando compostos cristalizados, como: brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico.

O ataque dos álcalis às rochas carbonáticas é denominado de desdolomitização, conforme a reação química abaixo (HASPARYK, 1999).



Após a ocorrência da desdolomitização, o carbonato alcalino (carbonato de sódio) reage com os produtos da hidratação do cimento, dentro da pasta de cimento, formando novamente álcalis, os quais darão continuidade da reação de desdolomitização. Este ciclo ocorrerá até o consumo total da dolomita ou até que a concentração de álcalis tenha sido reduzida por reações secundárias.



Valduga (2002) propôs outra possibilidade para a reação de desdolomitização' a qual trata-se de uma reação entre os íons hidroxilas e certos agregados que contém a dolomita, conforme a equação abaixo.



A diferença entre a reação álcali-carbonato e a reação álcali-sílica é que na reação álcali-carbonato o álcali é regenerado, (NEVILLE, 1997).

Segundo Katayama (2004), a reação álcali-carbonato caracteriza-se pela formação de pontos de brucita dentro das bordas da reação e halos de carbonatos de cálcio na pasta de cimento, entretanto, esse estágio não denota em expansão ou fissuração.

O comportamento expansivo dos agregados carbonáticos depende de sua textura e não da sua formação litológica (QUÍAN *et al.*, 2002).

Após avaliação de vários agregados de origem carbonática, constituídos por pequenas quantidades de silicatos em sua composição mineralógica, Silveira et al. (2006), deixaram

evidente que, além da desdolomitização desencadeada pelos carbonatos presentes nos agregados, houve a formação do gel característico da reação álcali-silicato. A reação álcali-carbonato é rara, não se tendo evidências concretas de sua ocorrência no Brasil.

A ABNT NBR 15577 não trata sobre a reação álcali-carbonato, sua avaliação deve ser procedida através das normas CSA A23.2-14A e CSA A23.2-26A.

### **3.5. QUÍMICA DA REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO**

Tiecher (2006) descreve a RAA como sendo um processo que envolve íons alcalinos, em especial o sódio ( $\text{Na}^+$ ) e o potássio ( $\text{K}^+$ ), derivados de frações argilosas (argila ou xisto) provenientes do cimento, íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) e alguns minerais que compõem os agregados.

Segundo Diamond (1975) os álcalis originados do cimento podem ser solúveis, encontrados nos sulfatos; e insolúveis encontrados nas fases sólidas presentes no clínquer, podendo todos os álcalis participar da reação deletéria.

A reação álcali-agregado ocorre em minerais com fases silicosas microcristalinas, criptocristalinas e amorfas por apresentarem maior área de contato e estrutura desordenada e não ocorre em minerais com fases silicosas bem cristalizadas.

Dent Glasser e Kataoka (1981) representaram a química da RAA de duas formas: a primeira quando o ataque dos íons hidroxilas (oriundos da reação de hidratação do cimento) se dá na superfície bem cristalizada da sílica e, a segunda, quando a sílica é bem cristalizada o ataque dos íons hidroxilas se dá somente na superfície externa, sendo que esse processo é muito lento, e poucos íons de sílica passam para a fase fluida. A sílica pouco cristalina permite a penetração generalizada dos íons hidroxila e dos íons alcalinos

(Na<sup>+</sup> ou K<sup>+</sup>), o que acaba por romper as ligações do sistema Si-O-Si, resultando em estruturas polieletrólítica contendo álcalis, ou seja, o gel da RAA, de acordo com a representação da Figura 3.9 (b).

Quando a sílica de um mineral é bem organizada (cadeia cristalina), os íons hidroxilas e alcalinos atacam somente na superfície externa e poucos íons de sílica passam para a fase fluida pelo fato desse processo ser lento, fase representada na Figura 3.9 (a).

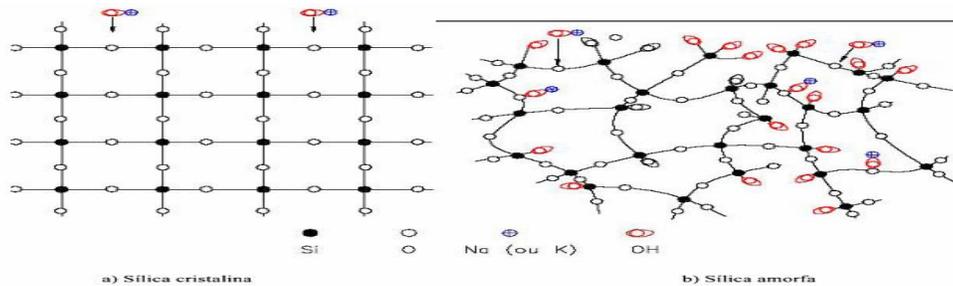
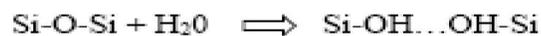


Figura 3.9. Representação química do ataque das hidroxilas à sílica (DENT GLASSER; KATAOKA, 1981).

De acordo com Hobbs (1988), álcalis presentes em compostos, quando participam das reações de hidratação no concreto, formam produtos como etringita (C-S-H) e as fases aluminato, liberando íons hidroxila (OH<sup>-</sup>). Os principais álcalis responsáveis pela alcalinidade da solução dos poros do concreto são o sódio (Na<sup>+</sup>) e o potássio (K<sup>+</sup>), sendo que estes participam nessa etapa apenas para balancear as cargas negativas.

Íons hidroxila (OH<sup>-</sup>) presentes na solução dos poros do concreto atacam as ligações do grupo siloxano (Si-O-Si) do agregado com fases reativas, rompendo as suas ligações e formando silanol (Si-OH), conforme a equação abaixo:



O silanol (Si-OH) formado na superfície do agregado é rompido pelos íons hidroxilas (OH<sup>-</sup>) com liberação de água, conforme a equação a seguir:



O rompimento das ligações é balanceado pelos íons alcalinos com cargas positivas, sódio e potássio, criando cargas negativas. Os íons  $\text{SiO}^-$  liberados, passam a ser atraídos pelos cátions alcalinos da solução dos poros, formando um gel sílico alcalino, de acordo com a equação abaixo.



De acordo com Fournier; Berubé (2000), o gel alcalino formado absorve água e não pode se expandir livremente, porque está contido pela pasta de cimento. O gel em expansão causa tensões de tração, conforme ilustra a Figura 3.10.

As fissuras no concreto ocorrerão quando a pressão exercida em determinado local pela reação expansiva exceder a resistência à tração da partícula de agregado ou da pasta de cimento.

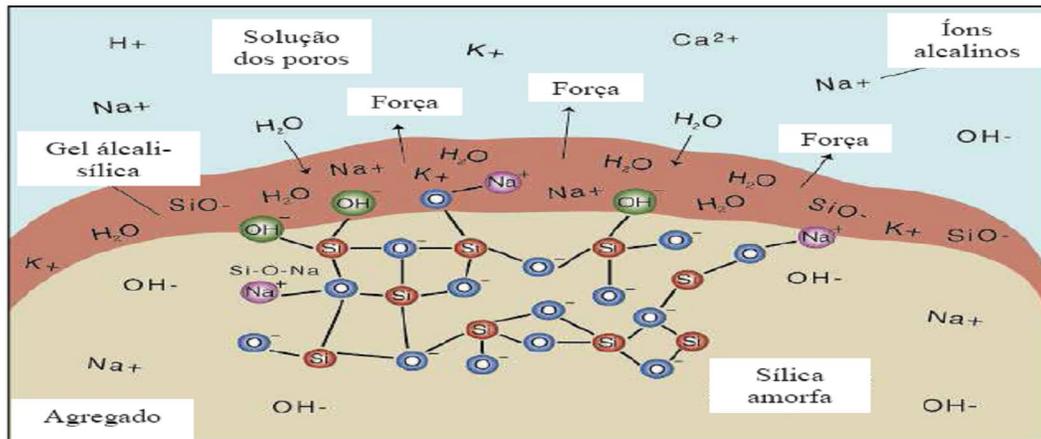


Figura 3.10 – Representação química da RAA até a formação do gel álcali-sílica exercendo pressão sobre a pasta ou agregado, por absorver água (COLLINS et al., 2008).

O mecanismo de expansão do gel formado pela RAA ainda não é claro, não se sabe exatamente como a composição química do gel se modifica durante a reação e como esta composição afeta a capacidade do gel expandir (PREZZI *et al.* 1997).

As teorias mais difundidas sobre os mecanismos de expansão são as de Hansen (1940), Vivian (1952) e Prezzi, Monteiro e Sposito (1997).

Hansen (1940) em sua teoria da pressão osmótica preconiza que a pasta de cimento age como uma membrana impermeável aos íons de sílica, e permite a passagem de água e hidróxidos alcalinos. Nessas condições, a difusão de água pelos poros acelera a reação, exercendo aumento na pressão, gerando expansão e fissuração da pasta de cimento.

De acordo com Furnas (1997), essa teoria preconiza que, a dissolução dos íons alcalinos do cimento dissolve-se na água de amassamento do concreto e com a hidratação do cimento a concentração da solução aumenta, tornando-se básica e atacando as partículas de agregado reativo. O produto é um gel que atrai as moléculas aquosas que provocam sua expansão.

Segundo Vivian (1951), se fosse verdadeira a teoria da pressão osmótica, ao iniciar a fissuração a membrana impermeável romperia, dissipando a pressão de expansão e todos os produtos da reação ao longo das fissuras. E assegura que o aumento de volume do gel dependerá da sua taxa de crescimento, concentração volumétrica e propriedades físicas. Quando a expansão é pequena, a pressão interna gerada é dissipada pela migração do gel. Contudo, se a expansão é alta, a pressão interna cresce a ponto de causar fissurações.

Prezzi et al., (1997) propuseram uma teoria para o mecanismo da expansão do gel baseando-se no conceito da dupla camada, de acordo com a teoria de Gouy-Chapman. Nela o gel de sílica é formado por partículas muito pequenas que se aproximam, mas nunca atingem o tamanho de uma molécula. Na superfície da sílica amorfa existem íons de oxigênio com ligações incompletas, que permitem uma troca iônica com os íons alcalinos adsorvidos por forças eletrostáticas à superfície da sílica. Ainda de acordo com os autores, os sólidos podem desenvolver carga elétrica por adsorção de íons. Quando um sólido entra em contato com um líquido a interface sólido-líquido eletrifica-se, o que acaba alterando as propriedades dos materiais. Na reação álcali-sílica ocorre a interação entre a sílica presente no agregado (possuindo a superfície altamente carregada negativamente) e

a solução alcalina dos poros do concreto. Essa interação leva à formação de uma dupla camada elétrica (composta por íons alcalinos: Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Ca<sup>++</sup>) localizada na superfície da sílica para neutralizar sua carga negativa. A sílica então é constantemente dissolvida e, dependendo da continuidade do fluido nos poros, os íons ficam difusos nas áreas afetadas. Com o tempo o resultado desse processo é o aumento da concentração de íons, enquanto a dupla camada aumenta de volume e a repulsão de forças diminui.

Apesar dos vários mecanismos de expansão propostos, cabe salientar que tanto os mecanismos como a velocidade de expansão variam de acordo com os minerais envolvidos na RAA, ou seja, de acordo com o tipo de reação (álcali-sílica, álcali-silicato ou álcali-carbonato).

### **3.6. CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DA REAÇÃO**

Segundo Paulon (1981), diversos fatores influenciam na reação álcali-agregado, pois o concreto é um agrupamento muito complexo de diferentes tipos de materiais com características físicas diversas, com condições ideais para a reação, mesmo que se utilize materiais não reativos ou cimento com baixo teor de álcalis.

Os principais fatores que desencadeiam a reação, segundo Hasparryk (1999), são: cimento e agregado (propriedade dos materiais); umidade, temperatura e tensões de compressão (influências externas) e o tempo.

Para que a RAA ocorra em estruturas de concreto são indispensáveis os seguintes fatores: concentração de hidróxidos alcalinos suficientes na solução dos poros do concreto para reagir com o agregado, agregados reativos, e umidade suficiente. Na ausência de qualquer um desses três fatores, a reação não ocorrerá (LOPES, 2004).

### 3.6.1. Concentração de hidróxidos alcalinos

O cimento Portland constitui o principal elemento para formação dos álcalis no concreto, sendo os álcalis por sua vez expressos na forma de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O) e óxido do sódio (Na<sub>2</sub>O).

No cimento, os álcalis são encontrados de duas formas: álcalis Solúveis: presentes nos sulfatos alcalinos (representam de 10 % a 60% dos álcalis totais) e álcalis Insolúveis: provenientes das soluções sólidas das fases presentes no clínquer (HASPARYK, 1999).

De acordo com Mehta e Monterio (2008), o teor de álcalis presente no cimento representado através da porcentagem equivalente de óxido de sódio pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}(\%) = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$$

O teor de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> está entre 0,2 a 1,5 % m, sendo que o PH atingido nas soluções dos poros do concreto fica na faixa de 12,5 a 13,5 caracterizando um PH elevado e uma solução fortemente básica. Tais soluções básicas podem desestabilizar e provocar reações com agregados silicosos ácidos.

Com a intenção de se evitar a reação entre os álcalis do cimento e os agregados reativos, o equivalente alcalino nos cimentos foi limitado em 0,60% (ASTM C 150, 1997).

Entretanto, de acordo com Furnas (1997), é necessário o estabelecimento de valores limites não somente de porcentagem de álcalis no cimento, mas também de cimento no concreto.

A relação entre o consumo de cimento no concreto e o equivalente alcalino do cimento, indicando a potencialidade reativa dessas combinações, pode ser representada pela Figura 3.11.

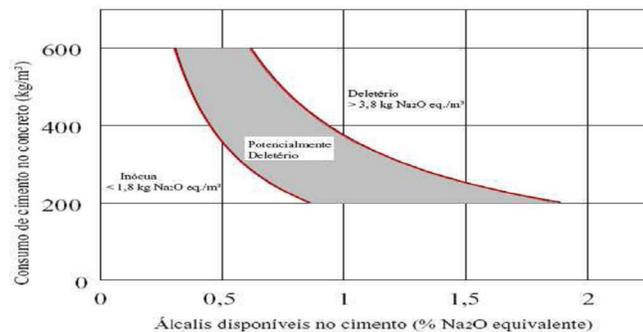


Figura 3.11. Relação entre o consumo de cimento no concreto e o equivalente alcalino do cimento (FURNAS, 1997).

Os valores limites dos álcalis do concreto estão relacionados com a intensidade da ação preventiva, classificada em função do tipo de estrutura e das condições de exposição, de acordo com a NBR 15577-1 (2008) que recomenda limitar o teor de álcalis do concreto, considerando-se uma intensidade de ação preventiva mínima, a valores menores que 3,0 kg/m³ de concreto, expresso em equivalente alcalino, bem como limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m³ de concreto, considerando-se uma intensidade de ação preventiva moderada.

Oberholster, Van Aardt e Brandt (1983), estabelecem os parâmetros para avaliar o comportamento expansivo para os agregados sul-africanos:

- Acima de 3,8 kg/m<sup>3</sup> de equivalente alcalino (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>), o agregado terá comportamento expansivo;
- Entre 1,8 kg/m<sup>3</sup> e 3,8 kg/m<sup>3</sup> de equivalente alcalino (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>), podem ocorrer expansões;
- Abaixo de 1,8 kg/m<sup>3</sup> de equivalente alcalino (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>), o agregado terá comportamento inócuo.

### **3.6.2. Agregados reativos**

Os agregados reativos possuem fases mineralógicas silicosas em sua composição, susceptíveis à reação com os álcalis solúveis do concreto. Características como tipo, forma, tamanho, composição dos agregados e área específica dos grãos, exibem comportamentos que afetam a magnitude da reação.

Guerra; Cunha (1994) relatam que as rochas podem ser classificadas em três tipos básicos, de acordo com a sua origem, sendo classificados em:

- Rochas Sedimentares, formadas por deposição de materiais provenientes da desagregação de rochas, tendo a água e o vento como principais agentes de transporte desses sedimentos. Quando os agentes perdem a capacidade de transportar, devido principalmente a uma diminuição da velocidade, ocorre a sedimentação (acúmulo de materiais nas bacias de sedimentação) que, por sua vez, são submetidos à compactação e à cimentação, dando origem às rochas sedimentares. Essas rochas representam cerca de 5% em volume da crosta terrestre, e cerca de ¾ de sua superfície

são por elas cobertos. As rochas sedimentares formam apenas uma película superficial sobre as rochas magmáticas e metamórficas.

- Rochas Metamórficas – formam-se, a partir da recristalização das rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas, a altas temperaturas e/ou pressões, ou deformam-se pela movimentação de placas tectônicas, promovendo transformações nas suas características mineralógicas e texturais. O metamorfismo pode ser de contato, dinâmico ou regional. O metamorfismo de contato ocorre devido a transformações da rocha encaixante pelo calor emitido de um corpo ígneo intrusivo; o dinâmico ocorre devido à pressão e ao cisalhamento sobre material rochoso a grandes profundidades, dando origem a milonitos; o regional ocorre onde às novas condições de pressão e temperatura sobre o material crustal originam variedades de rochas metamórficas, tais como: ardósias, filitos micaxistos e gnaisses. As rochas metamórficas representam cerca de 15% em volume da crosta terrestre.

- Rochas ígneas ou magmáticas, formadas pela solidificação do magma na crosta terrestre. À medida que o magma se desloca para regiões mais frias, perde calor e se consolida, cristalizando as faces minerais que constituirão as rochas ígneas. Existem vários tipos de magma que, conseqüentemente, dão origem a diferentes rochas ígneas, tais como: granito, gabros e sienitos (tipos intrusivos) e basaltos, fonolitos e riolitos (tipos extrusivos). A sílica é o principal constituinte do magma fundido a altas temperaturas e originado em grandes profundidades. As rochas ígneas são as classes de rochas predominantes na crosta terrestre, representando cerca de 80% em volume.

A textura de rochas com estruturas químicas e mineralógicas semelhantes apresentaram maiores deformações resultando em maiores expansões (MONTEIRO, 2001).

De acordo com Vivian (1951), a presença de agregados reativos de dimensão muito pequena (< 0,050 mm) provocam uma reação antes que o gel tenha se formado. A grande quantidade de superfície específica e materiais finos fazem com que a concentração de

álcalis seja rapidamente reduzida, impedindo a reação secundária nos agregados maiores, a qual provocaria a formação do gel expansivo.

Andriolo (2006), constatou que houve mitigação das expansões com o aumento do teor de finos com granulometria inferior a 0,075, utilizando-se areia artificial (pó-de-pedra).

Outro fator que aumenta o poder de reação dos agregados são as deformações tectônicas. As rochas contendo quartzo decorrente de processos tectônicos, especificamente o de cisalhamento, causam a deformação do cristal desse mineral que ocorre em quatro estágios: a extinção ondulante, lamelas de deformação, desenvolvimento de subgrãos e recristalização (HASPARYK, 1999).

O Quadro 3.1 apresenta uma relação de rochas e minerais susceptíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis do concreto.

**Quadro 3.1. Relação de rochas e minerais susceptíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis (NBR 15577-3, 2008).**

| Minerais reativos com cristalinidade baixa ou sílica metaestável e vidros vulcânicos  |   |  |
|---|---|--|
| Material reativo  | Rochas de ocorrência  |  |
|   | Rochas sedimentares   | Rochas vulcânicas  |
| Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico  | Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito  | Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, alguns basaltos |
| Rochas reativas contendo quartzo  |   |  |
| Material reativo  | Tipos de rocha  |  |
| Calcedônia, quartzo microcristalino e criptocristalino<br><br>Quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão | Chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito, quartzoso, calcário silicoso<br><br>Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino<br><br>Rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado: <ul style="list-style-type: none"> <li>• rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito</li> <li>• rochas sedimentares: arenito, grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo</li> <li>• rochas metamórficas: gnaisse, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia</li> </ul> |  |

Segundo Kihara (1993), os minerais podem ser classificados de acordo com a reatividade em ordem decrescente, da seguinte forma: amorfa (opala e vidro), microcristalina a criptocristalina (calcedônia), metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo, feldspato deformados e filossilicatos alterados).

De acordo com Sabrag (2003), alguns componentes reativos presentes nos agregados, associados ao tipo de reação álcali-agregado, devem ser evitados para confecção de estruturas de concreto que tenham contato direto com umidade elevada, como os apresentados no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2. Principais tipos de agregados reativos com os álcalis do cimento Portland (SABBAG, 2003).**

| <b>Tipo de Agregado</b>  | <b>Fase Mineralógica Reativa</b>  | <b>Natureza da Reação</b> |
|--|---|---------------------------|
| <b>GRUPO I - ROCHAS METAMÓRFICAS</b>   |   |                           |
| Granulito<br>Gnaiss<br>Quartzito<br>Xisto  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $\geq 25^\circ$   | Álcali - Silicato         |
| Filitos<br>Hornfels<br>Argilo  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$ ; quartzo microcristalino a criptocristalino | Álcali - Silicato         |
| <b>GRUPO II - ROCHAS SEDIMENTARES</b>  |   |                           |
| Arenito  | >30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$   | Álcali - Silicato         |
|  | Opala e Calcedônia.   | Álcali-Silica             |
| Grauvaca   | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$ ; quartzo microcristalino a criptocristalino | Álcali - Silicato         |
| Chert Calcário   | Calcedônia, opala, quartzo criptocristalino e microcristalino   | Álcali-Silica             |
|  | Calcita/dolomita, próxima a 1 e associado a argilominerais  | Álcali-Carbonato          |
|  | Opala, Calcedônia   | Álcali-Silica             |
| <b>GRUPO III - ROCHAS MAGMÁTICAS</b>   |   |                           |
| Granito<br>Granodiorito  | > 30 % de quartzo deformado, com ângulo de extinção ondulante $> 25^\circ$  | Álcali - Silicato         |
| Basalto  | Minerais de alteração: patagonita, opala, calcedônia  | Álcali-Silica             |
|  | Vidro vulcânico básico  | Álcali-Silica             |
| Pedra Pomes<br>Riolito<br>Andesito<br>Dacito<br>Latitos<br>Perlitos<br>Tufos Vulcânicos<br>Fonolitos | Vidros vulcânicos ácidos a intermediários e tridomita   | Álcali-Silica             |
| <b>GRUPO IV - MINERAIS E OUTROS</b>  |   |                           |
| Areia  | Opala (> 0,25%), Calcedônia (> 3%)  | Álcali-Silica             |
|  | Eventualmente quartzo deformado   | Álcali - Silicato         |

De acordo com Hasparyk (1999), quanto mais desestruturado for o agregado mais este poderá ser reativo com os álcalis do cimento (HASPARYK, 1999). As deformações tectônicas provocadas nas rochas também são responsáveis pela deformação na micro-estrutura do agregado, aumentando o poder de torná-lo mais reativo.

### 3.6.3 Umidade

Estruturas com sistema de drenagem deficiente, obras hidráulicas como barragens e concreto em contato com umidade são mais susceptíveis à reação álcali-agregado.

De acordo com os autores Mehta; Monteiro (2008), a água é o agente principal de deterioração física e química do concreto, por ser um excelente solvente, com capacidade de dissolver muitos elementos químicos, tornando-os ricos em íons e gases, além de ter grande facilidade em se mover através dos poros do concreto, devido ao tamanho de suas moléculas.

A presença de umidade é um fator essencial para ocorrência de reação álcali-agregado. Sem ela a RAA pode não ocorrer, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis (BICZOK, 1972).

Segundo Silveira *et al.* (2006) a umidade relativa se mantém no seu interior de concretos a níveis constantes, mesmo para estruturas não submetidas à presença constante d'água, pois a mistura dos materiais para proporcionar a moldabilidade do concreto é realizada muitas vezes com água em excesso.

Kuperman (2005) relata que é necessário haver um mínimo de 80% de umidade relativa para que a expansão causada pela reação seja significativa. Portanto, uma das maneiras mais eficientes para reduzir os danos causados pela reação seria tentar impedir o contato do concreto com a água ou impedir o ingresso da umidade no mesmo. Entretanto, até o presente momento, ainda não existe uma maneira econômica e absolutamente segura de impedir o ingresso de umidade.

O deslocamento dos fluídos no interior do concreto depende de sua permeabilidade, a qual está relacionada ao volume, tamanho, distribuição e continuidade dos poros da pasta de cimento endurecida, a permeabilidade, por sua vez, depende da relação água/cimento e da compacidade do concreto (NEVILLE, 1997).

Segundo o autor Wang (1990), a umidade do ambiente tem um importante papel no desencadeamento da reação. Ele explica que, em geral, o gel da RAA contendo baixos teores de cálcio tem grande aumento de absorção de água com o aumento da umidade. No entanto Furnas (1997) relata que é importante garantir que o teor de umidade seja constante, pois ciclos de molhagem e secagem podem provocar a concentração de álcalis em regiões localizadas do concreto.

De acordo com o mesmo autor, quando a umidade diminui abaixo de certos níveis, não ocorre à expansão devido à RAA, mas essa umidade é dependente da temperatura.

#### **3.6.4. Temperatura**

Valduga (2002) relata que o fator temperatura funciona como um catalisador da RAA, pois altas temperaturas, de um modo geral, aceleram as reações químicas.

Swamy e Al-Alasi (1988) verificaram que os concretos curados a 38°C apresentaram considerável redução da resistência à compressão com o passar de um ano, além de apresentarem expansão e fissuração bastante severas. As amostras curadas a 20°C mostraram poucas evidências de deterioração e aumento contínuo da resistência à compressão.

O aumento da temperatura torna o gel viscoso e facilita a percolação pelos vazios do concreto (HASPARYK, 1999).

#### **3.6.5. Tempo**

O surgimento de fissuras não ocorre em um determinado tempo específico. As expansões podem, eventualmente parar quando todos os minerais reativos presentes no agregado tiverem sido consumidos. Em alguns casos de barragens dos Estados Unidos da América, este fenômeno foi observado somente após 30 anos, através de análises de microscopia eletrônica de varredura (HASPARIK, 1999).

### **3.7. MÉTODOS A PARA A DETECÇÃO/MITIGAÇÃO DA RAA**

Thomas *et al.* (2006) relata que não existe método de ensaio totalmente confiável e sensível o suficiente na previsão de ocorrência de RAA, ou que apresente em tempo hábil, informações sobre a escolha do material a ser utilizado na confecção dos concretos.

Como cada método possui vantagens, desvantagens e limitações, o ideal é que se proceda à investigação, combinando diferentes tipos de métodos, a fim de se obter maiores evidências sobre o desempenho do agregado.

Os diversos métodos normatizados auxiliam na avaliação do comportamento do agregado, na combinação cimento-agregado quanto à reatividade potencial e, em casos potencialmente reativos, direcionam as condições adequadas de uso desses agregados a fim de se evitar o desencadeamento da reação expansiva com o passar do tempo ou mesmo avaliar estruturas de concreto que já apresentam indícios da RAA.

### 3.7.1 Análise petrográfica

Método utilizado para se obter informações qualitativas sobre os minerais e a natureza do agregado ou em amostras de concreto, que possuam instaladas, ou que possam vir a sofrer a reação álcali-agregado.

As técnicas utilizadas para a investigação do agregado, através da análise petrográfica para identificar minerais potencialmente reativos, são:

- Observações macroscópicas e microscópicas através de microscopia estereoscópica (luz refletida), microscopia óptica (luz transmitida) e microscopia eletrônica;
- Técnicas analíticas, utilizadas para caracterizar a textura e forma cristalina da sílica nas partículas dos agregados tais como difração de raios-x e espectroscopia de infravermelho.

As amostras dos agregados ou concretos deverão ser confeccionadas em lâminas delgadas, com aproximadamente 30 µm de espessura, para serem observadas através do microscópio eletrônico polarizador de luz transmitida.

O resultado do método petrográfico em rochas fornece informações, tais como: composição mineralógica, arranjo estrutural dos componentes, forma, textura, granulação, além de chamar a atenção para a presença de minerais reativos e fases deletérias quanto a RAA.

Nos concretos, além de classificar os agregados, a análise petrográfica determina a ocorrência de feições ou características provenientes da reação álcali-agregado, tais como gel nos poros, bordas de reação ao redor dos agregados e presença de microfissuras.

Os resultados da análise petrográfica não mostram se um determinado agregado causará expansões deletérias no concreto, para isto deverá ser utilizado outro método de ensaio.

De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2008), a análise petrográfica e a caracterização mineralógica isolada não são suficientes para avaliar a expansão potencial deletéria devido à reação álcali-agregado, embora forneçam informações importantes para essa avaliação.

Atualmente os ensaios em agregados baseiam-se em análises macro e microscópicas (em lâminas delgadas) que podem ser complementados com análises de difração de raios-X (DRX), análise termodiferencial (ATD), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de raios-X por energia dispersiva (EDX) (HASPARYK, 1999).

A normalização vigente classifica os agregados através da análise petrográfica, como sendo potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Sugere ainda, limites para a classificação, em função do teor máximo de materiais reativos presentes no agregado, conforme a Tabela 3.3 (ABNT, 2008).

**Quadro 3.3. Limites de fases reativas, presentes no agregado, sugeridas na NBR 15577-3, para classificá-lo como potencialmente inócuo frente à RAS.**

| Material reativo  | Teor máximo para classificar o agregado como sendo potencialmente inócuo a RAS |
|---|--|
| Quartzo deformado   | 5% (cinco por cento)   |
| Calcedônia  | 3% (três por cento)  |
| Tridimita ou cristobalita   | 1% (um por cento)  |
| Vidro Vulcânico   | 3% (três por cento)  |
| Opala   | 0,5% (meio por cento)  |
| Com base na experiência e nas feições presentes, poderá o petrógrafo responsável pela análise, admitir limites distintos. |  |

É necessária a realização do ensaio por petrógrafo experiente, que possua a habilidade de classificar o potencial reativo de um agregado e não somente identificar os minerais neles presentes (KUPERMAN *et. al.*2005).

### **3.7.2. Microscopia eletrônica de varredura**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é um método que possibilita classificar os diversos tipos de géis formados pela RAA. Pode-se também identificar as bordas de reação na interface da pasta com o agregado e a existência de gel álcali-silicoso disperso na argamassa, poros e fissuras do agregado.

Amostras de concreto ou argamassa que foram submetidas a ensaios para se avaliar a reatividade potencial do agregado ou as amostras oriundas de obras com indícios de expansão podem ser avaliadas por este método.

Segundo Hasparyk (1999), as amostras são submetidas à análise visual através da lupa estereoscópica para identificação dos pontos que serão analisados. Após análise visual, as amostras são analisadas através do microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se, em conjunto, a técnica de espectrometria de energia dispersiva, que possibilita uma correlação entre as diversas morfologias características dos produtos encontrados e seus componentes químicos.

A microscopia eletrônica de varredura permite analisar o gel produto da reação, através de bordas nas interfaces da pasta/agregado em amostras polidas, dos poros das amostras, bem como dispersos na argamassa e depositados nas fissuras dos agregados. Com as amostras polidas é possível observar imagens com controle de tonalidades e obtenção da composição química (HASPARYK, 1999).

Esse método permite análises em grandes ampliações, possibilitando a identificação precisa da morfologia dos produtos de RAA, no qual pode-se verificar a deterioração da estrutura devida à concentração dos produtos e classificar-se os vários tipos de géis formados.

### **3.7.3. Método Acelerado das Barras de Argamassa**

Este método ficou conhecido como método acelerado da África do Sul ou método NBRI, desenvolvido por (OBERHOLSTER; DAVIES1986).

O referido método é preconizado por várias normas, dentre elas encontram-se a ASTM C 1260 (2005), americana; a NBR 15577-4 (2008), brasileira; e a CSA A23.2-25A (1994), canadense.

Método no qual barras de argamassa foram preparadas de acordo com o método americano, mas estocadas a 80 °C em solução de NaOH a 1N, encontraram-se resultados promissores. Através da continuidade de investigações, pôde-se estabelecer um limite máximo de 0,11% aos 12 dias de cura alcalina em hidróxido de sódio (NaOH) para definir-se um agregado inócuo, sendo considerado deletério o valor acima desse limite.

Atualmente no Brasil e no mundo, o método acelerado das barras de argamassa (ASTM C 1260, 2005), é o mais utilizado, por necessitar de menor espaço em laboratório e investigar de maneira rápida o comportamento de um agregado quanto a RAA.

Neste método a reação álcali-agregado é analisada, por meio de estudo da variação de comprimento de barras de argamassa moldadas com agregados e cimentos. Os agregados devem se enquadrar em frações pré-estabelecidas por norma na forma de areia (natural ou artificial) para serem testados.

A norma americana não fixa o teor de álcalis em relação ao tipo de cimento a ser utilizado, mencionando que este tem um efeito mínimo ou desprezível nas expansões da reação. Mas limita a expansibilidade do cimento em autoclave, ASTM C 150 (2005), em 0,20% de

forma a não se ter expansões adicionais geradas pelo óxido de magnésio (MgO) e/ou óxido de cálcio (CaO) e estas não serem confundidas com a expansão da RAA.

Já as normas canadense e brasileira fixam o teor de álcalis em  $(0,90 \pm 0,10)\%$ .

As barras são moldadas nas dimensões (25 x 25 x 285) mm, e após a desmoldagem, imersas em água a 80 °C, realizando-se a primeira leitura após 24 horas. Em seguida, são submersas em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH 1N) a 80 °C, realizando-se leituras periódicas do comprimento das barras através do relógio comparador.

No Brasil, o método foi normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da NBR 15777-4 (2008).

De acordo com Thomas et al., (2006), o método consiste em executar barras de argamassas com os mesmos materiais empregados no concreto e submetê-las a um banho térmico de 80°C de solução de hidróxido de sódio (NaOH) por 14 dias. Os resultados de expansão são avaliados após 16 dias, contados a partir da data da confecção das barras. Ainda de acordo com o autor, o método não é indicado para as reações do tipo álcali-carbonato.

Este método também é utilizado para a avaliação dos inibidores da RAA.

Thomas et al. (2006) concluíram que os resultados do método, apesar de não traduzirem com precisão a realidade, podem garantir a segurança de prevenção da RAA.

Entretanto, Sanchez, (2008) afirma que o método, embora de fácil execução e prático, tem apresentado resultados incoerentes em campo. Alguns agregados, indicados como reativos no ensaio, têm se apresentado inócuos no campo (falso-positivos), bem como, agregados indicados como inócuos no ensaio, demonstraram ser reativos no campo (falso-negativos).

A forma de moagem dos agregados, gerando grãos com formatos e superfícies específicas diferentes, assim como, variações na consistência da argamassa e na relação água/cimento, geram variações significativas no resultado dos ensaios (VALDUGA, 2007). O mesmo autor, elevou o tempo de permanência das barras na solução de Na(OH), em até 182 dias, monitorando a sua expansão. Os resultados obtidos demonstraram que a rocha avaliada que apresentava menores expansões aos 28 dias, apresentava as maiores expansões às idades avançadas.

Os limites de expansão e o período de tempo de análise dos agregados no ensaio acelerado das barras de argamassa ainda não são um senso comum, pois existem várias normas para o ensaio em questão, cujos limites de expansão e tempo foram adaptados de acordo com os agregados existentes nos vários países, conforme mostra a Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 Adaptações do método acelerado das barras quanto aos limites de expansão e tempo adotados em diferentes países (BELLEW, 1997).**

| País                         | Idade (dia) | Limite de expansão (%) |
|------------------------------|-------------|------------------------|
| África do Sul                | 12          | 0,11                   |
| Itália                       | 12          | 0,10                   |
| Austrália                    | 10-22       | 0,10                   |
| Canadá - CSA A23.2-25A       | 14          | 0,15                   |
| Estados Unidos - ASTM C 1260 | 14          | 0,10                   |
| Noruega                      | 14          | 0,15                   |
| Argentina                    | 28          | -                      |

#### **3.7.4. Método das Barras de Argamassa (MBT)**

De acordo com Thomas *et al.* (2006), o ensaio não é recomendado para identificar o potencial reativo de um agregado, bem como, o nível de prevenção para mitigar a

expansão, devido à falta de representatividade do ensaio frente a alguns agregados lentamente reativos, como certos tipos de gnaisses, argilitos, quartzitos, grauvacas.

Segundo Kuperman *et al.* (2005), o método tem custo reduzido, entretanto, possui desvantagens como resultados sem muita confiabilidade. A falta de confiabilidade nos resultados deve-se à:

- Falha na detecção de agregados que apresentam reatividade lenta;
- Excesso de lixiviação dos álcalis presentes nas argamassas das barras;
- Composição granulométrica dos agregados britados, não reproduz a realidade.

### **3.7.5. Método para avaliar combinação agregado/material cimentício**

Este método analisa a combinação cimento/agregado através do mesmo procedimento operacional do método acelerado das barras de argamassa, incluindo moldagens, condições de armazenamento, cura e leituras, e é preconizado pela ASTM C 1567 (2005).

Neste método, o cimento Portland empregado na execução das barras de argamassa pode ser qualquer tipo, estando ou não combinado com adições tais como escória de alto forno, sílica ativa e metacaulim.

No caso de adições em substituição parcial ao cimento empregado, pode ser necessário o uso de um aditivo superplastificante, de forma a manter-se a consistência da argamassa em 7,5% daquela obtida numa argamassa previamente preparada com o cimento original.

Obtém-se a consistência por meio de 30 golpes, em aproximadamente 30 segundos. Caso se utilize aditivos na realização da moldagem das barras, a parcela de água adicional na mistura deve ser considerada no cálculo da relação água/material cimentício.

Existe comprovação da mitigação da RAA quando as expansões exibirem porcentagens inferiores a 0,10% aos 14 dias a partir da leitura inicial. Para expansões iguais ou superiores a 0,10% no mesmo período, são necessários novos ensaios a partir de novas misturas de adições (NBR 15577-5, 2008).

Segundo a ASTM C 1567 (2005), as expansões inferiores a 0,10% aos 14 dias a partir da leitura inicial são classificadas como inócuas, e classificadas como reativas as superiores a 0,10%.

### **3.7.6. Método dos prismas de concreto**

Segundo os autores Thomas et al. (2006), o método foi criado visando identificar rochas potenciais às reações álcali-sílica e álcali-carbonato, na cidade de Ontário no Canadá.

Esse método é preconizado pelas seguintes normas: canadense A.23.2-14A (CSA, 2000) e americana C-1293 (ASTM, 2005) e no Brasil, pela NBR 15577-6 (ABNT, 2008).

O método consiste em avaliar a disposição de um agregado (gráudo ou miúdo) em participar ou não da reação deletéria, por meio da variação do comprimento de prismas de concreto. Também pode ser utilizado na investigação de combinações de agregados miúdos e gráudos para uma combinação específica de concreto, assim como da combinação com o cimento e eventuais adições.

Para a aplicação, são moldados para cada avaliação, três prismas de concreto (Figura 3.12) com dimensões de (75 x 75 x 285) mm. Após a moldagem, são submetidos à cura, em câmara úmida ou tanque de cura, durante as primeiras 24 horas.



Figura 3.12 – Moldes e sistema de leituras empregados no método CPT (SANCHEZ (2008)).

Após a desforma, fazem-se as primeiras leituras e na seqüência os prismas são acondicionados em recipientes, herméticos, tronco-cônicos, revestidos com material absorvente, com volume entre 19 e 22 litros, com água até a altura de  $(20\pm 5)$ mm acima do seu fundo, providos de grade ou prateleira de fundo em ambiente com temperatura de  $(38\pm 2)^\circ\text{C}$  e fluxo de ar no entorno do recipiente, durante todo o ensaio

De acordo com Sanchez (2008), os recipientes não deverão ter contato com as paredes e piso (ou fundo) das áreas destinadas aos seus acondicionamentos.

As expansões dos prismas são avaliadas nas idades de 7, 28, 56 dias e posteriormente em períodos mensais dos 3 aos 12 meses.

De acordo com as normas Brasileiras NBR 15577-6 (ABNT, 2008), normas canadense A.23.2-27A (CSA, 2000) e pela norma americana C-1293 (ASTM, 2005), é caracterizado como inócuo o potencial reativo, sempre que a expansão após 1 (um) ano foi inferior a 0,04% e potencialmente reativo, quando as expansões nessa mesma idade, forem superiores a 0,04%. Este mesmo valor é preconizado pelas normas canadense A.23.2-27A (CSA, 2000) e na norma americana C-1293 (ASTM, 2005).

### **3.7.7. Método acelerado dos prismas de concreto**

De acordo com Thomas *et al.* (2006), o ensaio consiste numa variação do método dos prismas, no qual os prismas são submetidos à temperatura de 60°C, ao invés de 38°C, reduzindo-se o tempo de ensaio.

A proposta do método era reduzir o tempo de sua realização, passando de 12 meses para 3 meses, através da aceleração da taxa de expansão pelo aumento da temperatura para 60 °C.

Após análises de vários testes do referido método, utilizando-se agregados de várias localidades, pesquisadores perceberam que existia uma correlação entre o método dos prismas de concreto e o método acelerado dos prismas de concreto aos 3 meses (FOURNIER *et al.*2004).

Pesquisadores têm especificado diferentes tempos de exposição e limites para classificação dos agregados como sendo potencialmente reativo, conforme se pode observar na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3. Especificações de pesquisadores para o método dos prismas acelerado (FOURNIER et al, 2004).**

| Autores                       | Limite de referência (CPT)     | Limite proposto a 60°C   |
|-------------------------------|--------------------------------|--|
| Ranc e Debray (1992)          | 0.04% exp. aos 8 meses (38°C)  | 0.015% a 4 semanas, ou 0.08% a 8 semanas   |
| Bolotte (1992)                | 0.04% exp. aos 8 meses (38°C)  | 0.024% a 8 semanas   |
| Murdock e Blanchette (1994)   | 0.04% exp. aos 12 meses (38°C) | 0.02% a 8 semanas, ou 0.03% a 13 semanas   |
| De Grosbois e Fontaine (2000) | 0.04% exp. aos 12 meses (38°C) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.04% a 13 semanas para agregados carbonáticos</li> <li>• 0.025% a 13 semanas para agregados ígneos e metamórficos</li> </ul> |
| Touma et al. (2001)           | 0.04% exp. aos 12 meses (38°C) | 0.04% a 13 semanas   |

Sanchez (2008) propôs um método acelerado alternativo, baseado em ensaios de agregados encontrados no Brasil com litologias diferentes, o qual consistia em acelerar ainda mais o ensaio, elevando a temperatura para 80°C e imergindo os prismas em solução de NaOH a concentração de 1N, de forma a se qualificar o potencial reativo aos 28 dias de idade. Todavia, conforme o autor do método proposto, este necessita ser reproduzido para uma gama maior de agregados visando comprovar a sua efetividade.

A Figura 3.13 mostra uma análise comparativa entre os métodos dos prismas de concreto e o método acelerado brasileiro de prismas de concreto.

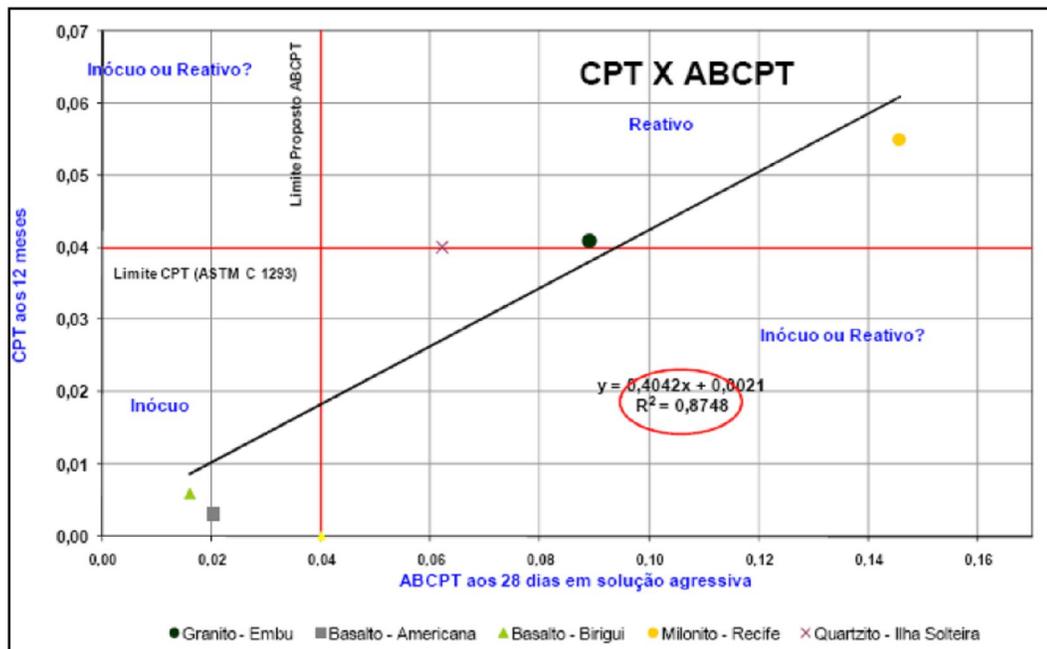


Figura 3.13 – Análise comparativa entre os métodos dos prismas de concreto (1 ano) e o método acelerado brasileiro de prismas de concreto (1 mês) (SANCHEZ, 2008).

O procedimento operacional proposto para o método acelerado de prismas de concreto é o mesmo do ASTM C 1293 (1995), com exceção da concentração da solução e cura dos mesmos.

### **3.7.8. Método Osipov**

Este método foi desenvolvido pelo Engenheiro Albert Osipov, do *Institute* Hidroproject de Moscou, é também denominado de método térmico (VALDUGA, 2002).

O ensaio consiste na submissão das partículas de agregado, com diâmetro entre 20 mm e 50 mm à temperatura aproximada de 1000°C durante 60 segundos. Desta forma, os agregados, que apresentarem fragmentação de suas partículas após o ensaio, são classificados como sendo reativos frente aos álcalis.

O método apresenta algumas desvantagens, como: ensaio não aplicável aos agregados miúdos e agregados ensaiados que não sofrem fragmentação, não são classificados como não reativos.

### **3.7.9. Método Químico**

Richard Mielenz desenvolveu esse método, também conhecido como ensaio químico rápido, entre os anos de 1947 e 1952, tendo sido empregado no mapeamento de agregados deletérios em regiões dos Estados Unidos (ANDRIOLO, 1997).

Os procedimentos metodológicos são preconizados pelas seguintes normas C 289 (ASTM, 2003) e na antiga NBR 9774 (ABNT, 1987), a qual foi cancelada em dezembro de 2008.

Esse método é empregado na avaliação potencial álcali-sílica de um agregado, com base na relação entre a sílica dissolvida (Sd) e a redução de alcalinidade (Rc) da solução de NaOH, a qual o agregado é submetido (PAULON, 1981). E consiste basicamente na imersão de uma pequena fração de agregado passante na peneira 0,3mm e retida na peneira 0,15mm, durante 24 horas, em uma solução de NaOH, à concentração de 1N (um normal) e em temperatura de 80°C. Posteriormente, através de processos de gravimetria ou fotometria, a solução é titulada determinando-se a redução de sua alcalinidade, assim como, após a filtração é determinada quantidade de sílica dissolvida. Os resultados classificarão o agregado como sendo inócuo, potencialmente deletério, ou deletério.

O ensaio tem como principal vantagem a velocidade de execução. No entanto, muitas vezes não reproduz resultados confiáveis, o que, não raras às vezes muitas vezes, torna necessária a avaliação complementar através de outros métodos.

Em avaliação dos agregados do estado de São Paulo, Valduga (2002) demonstrou que uma grande maioria dos agregados, avaliados como sendo potencialmente reativos, foram classificados como inócuos quando submetidos ao ensaio químico.

### **3.8. Procedimentos para mitigar as reações álcali-agregado**

### 3.8.1. Uso de aditivos químicos

Aditivos químicos incorporados à massa de concreto têm sido utilizados para inibir a RAA, através de duas propostas, sendo a primeira uma tentativa de reduzir a expansão do gel, aplicando tratamentos com soluções de Li; e a segunda é uma proposta bastante recente, de expor o concreto parcialmente afetado pela RAS às soluções com silano, com o objetivo de impermeabilizar os grãos de agregados reativos e impedir o avanço da reação.

McCoy e por Caldwell em 1951 e Lawrence e Vivian em 1961 foram os primeiros a desenvolverem estudos com sais de lítio para mitigar a RAA e concluíram que a eficiência desses sais na minimização da expansão depende, principalmente, da natureza ou reatividade do agregado, da forma do sal de lítio e da quantidade de álcalis-presente no sistema (FENG et al., 2005).

De acordo com estudos, aproximadamente metade da quantidade de lítio adicionada para minimizar a RAA é absorvida pela hidratação do cimento e a retenção do lítio pelo C-S-H é maior do que do sódio e do potássio, ficando disponível somente metade do lítio adicionado para minimizar a reação.

Considera-se que o lítio ( $\text{Li}^+$ ) substitui parte do sódio e do potássio presente no gel resultante da reação. O  $\text{Li}^+$  é capaz de inibir a reação porque tem menor raio atômico e maior densidade de superfície carregada que o  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ , o que o capacita a entrar nos produtos da reação mais rapidamente, fazendo com que seja produzido um gel cristalino e não-expansivo (MO, et al. 2003).

Segundo Collins et al. (2004), os aditivos à base de lítio ( $\text{LiOH}$ ,  $\text{LiCl}$  e  $\text{LiNO}_3$ ) aumentam a dissolução de sílica. Contudo, esse aumento não causa acréscimos na expansão, pois a expansão devido à reação álcali-sílica na presença de lítio não depende da quantidade de sílica dissolvida, e sim da formação de um complexo lítico-silicático.

Dentre todos os sais de lítio, o  $\text{LiNO}_3$  é o mais eficiente pelo fato de não aumentar a concentração de íons  $\text{OH}^-$  na solução dos poros, ser neutro e altamente solúvel.

Os efeitos do hidróxido de lítio ( $\text{LiOH}$ ), foram avaliados, através da imersão de barras de argamassas em solução de 0,5M de  $\text{LiOH}$ , após o desencadeamento da reação do  $\text{Na}^+$  e do  $\text{K}^+$  com os agregados. Avaliação que indicou decréscimo nas expansões com o tempo, após a imersão no  $\text{LiOH}$ , e que o gel formado na interface entre a pasta e os agregados reativos aparentemente é substituído pelos íons  $\text{Li}^+$  da solução externa, significando que o  $\text{LiOH}$  pode ser capaz de deter as expansões desencadeadas pelo  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ .

Segundo FENG et al. (2005) os mecanismos que explicam a minimização da expansão devida à reação álcali-agregado, estão baseados principalmente na natureza dos produtos de reação na repolimerização do gel e na dissolução da sílica.

Kurtis et al. (2000) propuseram a teoria da repolimerização do gel, na qual sugeriram que o efeito do lítio na minimização da RAA não depende unicamente da quantidade de sílica dissolvida, mas da limitação do gel em se repolimerizar quando na presença de lítio, reduzindo seu potencial de expansão.

Estudos revelaram que há uma redução da dissolução da sílica à medida que o teor de lítio aumenta (Collins et al., 2004).

Em análises de corpos de prova extraídos da Usina Hidrelétrica de Furnas e moldados em laboratório Hasparyk (2005), avaliou-se a eficiência dos sais de lítio em combater a RAA e concluiu-se que o lítio é capaz de reduzir parte da expansão residual do concreto extraído, entretanto não foi tão eficiente nos corpos-de-prova moldados em laboratório.

Para Feng et al. (2005), quando sódio e potássio estão presentes, há uma dosagem adequada de lítio em que o gel deixa de ser expansivo e passa a não-expansivo. A

questão é saber qual é essa dosagem e qual é o mecanismo principal da redução da expansão.

### **3.8.2. Adições minerais**

Pode-se caracterizar as adições minerais, como sendo materiais silicosos finamente moídos, provenientes da queima em fornos que utilizam carvão como combustível em usinas termoelétricas e fornos metalúrgicos que produzem ferro fundido, ferro-silício e ligas de ferro. Esses produtos exercem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto, mesmo que tenham sido adicionadas ao cimento Portland, aumentando a durabilidade do concreto aos ataques químicos e expansão álcali- agregado (METHA; MONTEIRO 2008).

De acordo com a NBR 12653 (1992), dois tipos de materiais se consagraram por sua vantajosa adição ao clínquer Portland: as escórias de alto-forno e os materiais pozolânicos.

As principais pozolanas adicionadas aos cimentos brasileiros são as cinzas volantes, subproduto da queima do carvão mineral em usinas termelétricas, e as argilas calcinadas, ativadas a temperaturas próximas a 800°C.

Os cimentos mais eficientes na minimização da reação álcali-agregado são os de alto-forno (CP III) e os pozolânicos (CP IV), que representaram 13% e 8% da produção nacional em 2003, respectivamente.

A adição de aproximadamente 25% de cinza volante com baixo teor de cálcio em substituição ao cimento Portland reduz significativamente a expansão proveniente da reação álcali-sílica da maioria dos agregados e é o valor recomendado por instituições públicas e privadas de vários países. .

Escórias de alto-forno apresentam vantagens semelhantes às da cinza volante, mas normalmente é necessário o dobro de escória de alto-forno em relação à cinza volante para reduzir a expansão álcali-sílica aos mesmos níveis (MALVAR et al., 2002).

Outra adição mineral que vem sendo testada é a escória granulada de alto-forno, sendo essa adição eficiente para evitar a reação álcali-sílica, sendo que as expansões diminuem conforme aumenta sua quantidade na amostra. No entanto, a escória não se mostrou eficaz no combate da reação álcali-carbonato, em conclusões obtidas por Chen *et al.* (1993) com vários tipos de adições minerais, além da escória. Em avaliação sobre a eficiência da escória de alto-forno e da sílica ativa na inibição das expansões decorrentes da RAA, os autores Kormann et al. (2004) verificaram o uso de sílica ativa em substituição de 10% sobre a massa de cimento CP II-Z sendo mais eficaz que a substituição de 50% de escória.

O autor Hasparyk (1999) investigou a eficiência de adições minerais, como a sílica ativa e a cinza de casca de arroz na minimização da expansão, e constatou que o teor ótimo de adição ao cimento é de 15% para os agregados dos tipos basalto e quartzito analisados, embora 12% de ambas as adições sejam suficientes para reduzir a expansão para os níveis recomendados pela ASTM C 1567 (2005), ou seja, inferior a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina.

Recentemente, vem se estudando o metacaulim como fonte de adição mineral no combate a RAA. Esse material é obtido através do tratamento de certos tipos de resíduos como os provenientes da indústria de papel, e constitui-se, basicamente, de caulim beneficiado, tem extrema alvura, finura e pureza (alto teor de caulinita). Este produto é transformado em pozolana aluminossilícica, através do processo de calcinação (700°C à 800°C) e moagem. (SOUZA; EDAL MOLIN, 2004).

Os autores, Ramlochan *et al.* (2004) comprovaram a eficiência do metacaulim em controlar a expansão causada pela reação álcali-sílica quando adicionado em substituição parcial ao cimento Portland. Os ensaios realizados em prismas de concreto indicaram que 10 a 15% de adição de metacaulim são suficientes para mitigar a reação, dependendo do tipo de agregado.

No entanto, Gruber *et al.*, 2001, propuseram o uso de teores de 10% a 20% de metacaulim para prevenir expansões deletérias devido a RAA. Ainda segundo os autores, substituições da ordem de 20% reduzem significativamente a concentração de hidróxidos alcalinos na solução dos poros do concreto, ficando com valores da ordem de 0,16M a 0,18M, sendo que o mínimo necessário para iniciar a reação é de aproximadamente 0,2M.

Já Sibbick, Nixon (2000) obtiveram resultados com adições de 10% de metacaulim, os quais foram suficientes para mitigar a reação de três agregados reconhecidamente reativos. Os ensaios foram realizados em prismas de concreto a 38°C e 100% de umidade durante 24 meses.

O método do prisma de concreto ASTM C 1293 (2005) e o método acelerado das barras de argamassa ASTM C 1567 (2005), mais comumente utilizados para avaliar a eficiência das adições ativas na minimização da expansão devida à reação álcali-agregado.

Os autores, Ramlochan *et al.* (2004) compararam as expansões de argamassas confeccionadas com pozolanas (dois tipos de cinza volante), super pozolanas (sílica ativa e metacaulim) e escória de alto-forno, e verificaram que após um ano, sob condições aceleradas, as amostras confeccionadas com sílica ativa tiveram expansões superiores a 1% e as amostras com as demais adições tiveram expansões inferiores a 0,1%, o que demonstra que foram eficazes no combate a RAA.

Ao avaliar os resultados obtidos na literatura, nota-se que existem teores e frações granulométricas ideais para que essas adições não desencadeiem a reação ao invés de

impedi- lá. Isso deve ser considerado principalmente com relação à sílica ativa e à cinza de casca de arroz, devido à sua potencialidade de aglomeração e à sua composição química, pois estes materiais possuem grandes percentuais de sílica amorfa.

O Quadro 3.4 mostra alguns teores de adições sugeridos por esses autores tomados como referência em experimentações realizadas.

**Quadro 3.4. Teores de minerais / pozolânicas empregados para inibição da RAA, empregados em substituição do cimento e na presença de aditivos plastificantes. (HASPARYK, 2005).**

| <b>Adições minerais / pozolânicas</b> | <b>Teores de adições (%)</b> |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Sílica ativa*                         | 10 a 15                      |
| Cinza de casca de arroz amorfa*       | > 12                         |
| Metacaulim*                           | 10 a 25                      |
| Pozolana natural                      | 20 a 30                      |
| Cinza volante                         | 25 a 50                      |
| Escória de alto-forno moída           | 40 a 65                      |

Usando-se cimentos adequados ou com adições minerais / pozolânicas em proporções corretas, a sílica presente nesses constituintes fará com que os álcalis solúveis, oriundos da hidratação do cimento, sejam consumidos antes que os hidróxidos reajam com a sílica provida pelos agregados.

Para que os efeitos das adições empregadas, com o objetivo de inibir ou diminuir os danos da RAA nas estruturas de concreto, possam ter eficácia, é imprescindível eliminar fontes externas de álcalis, possivelmente presentes na água de amassamento e nos aditivos empregados.

#### **4 DIRETRIZES NORMATIVAS NACIONAIS ABNT NBR 15577/2008**

O comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/CB18), através da Comissão de Estudo de Requisitos e Métodos de Ensaio de Agregados (CE-18:200. 01), publicou em 2008 um conjunto de normas, denominadas NBR 15577, divididas em 6 (seis) partes visando a orientação preventiva às reações álcali-agregado.

A NBR 15577-1 (ABNT, 2008) trata-se de um guia para avaliação da reatividade potencial e de medidas de prevenção às reações.

A referida norma (todas as partes) preconiza as medidas necessárias para se evitar a ocorrência de reações expansivas deletérias; estabelece diretrizes para a avaliação do risco de ocorrência das manifestações patológicas relativas à reação álcali-agregado; prescreve requisitos para a análise da reatividade potencial; indica a metodologia para aplicação dos ensaios em amostras coletadas e recomenda medidas preventivas para o emprego de agregados em concreto, quando este for potencialmente reativo ou quando houver dúvidas quanto a sua reatividade.

#### **4.1. Análise de Risco**

De acordo com a ABNT NBR 15577-1 (2008), a determinação do nível de precaução e mitigação depende da realização de uma análise de risco do comprometimento de seu desempenho durante a vida útil.

Devem ser analisados, além da composição do concreto, outros fatores para se estabelecer o risco de comprometimento de desempenho pela ocorrência da reação álcali-agregado, tais como:

- a) As condições de exposição da estrutura ou do elemento de concreto ao ambiente em contato com água, úmido ou seco;
- b) As dimensões da estrutura ou do elemento de concreto: maciço ou não maciço;
- c) A responsabilidade estrutural.

A ação preventiva necessária para evitar danos decorrentes da reação álcali-agregado está intimamente ligada ao grau de risco de sua ocorrência em função das condições de exposição e do tipo de estrutura ou elemento de concreto no qual o agregado será empregado, conforme apresentado no fluxograma da Figura 4.1 (ABNT NBR 15577/2008).

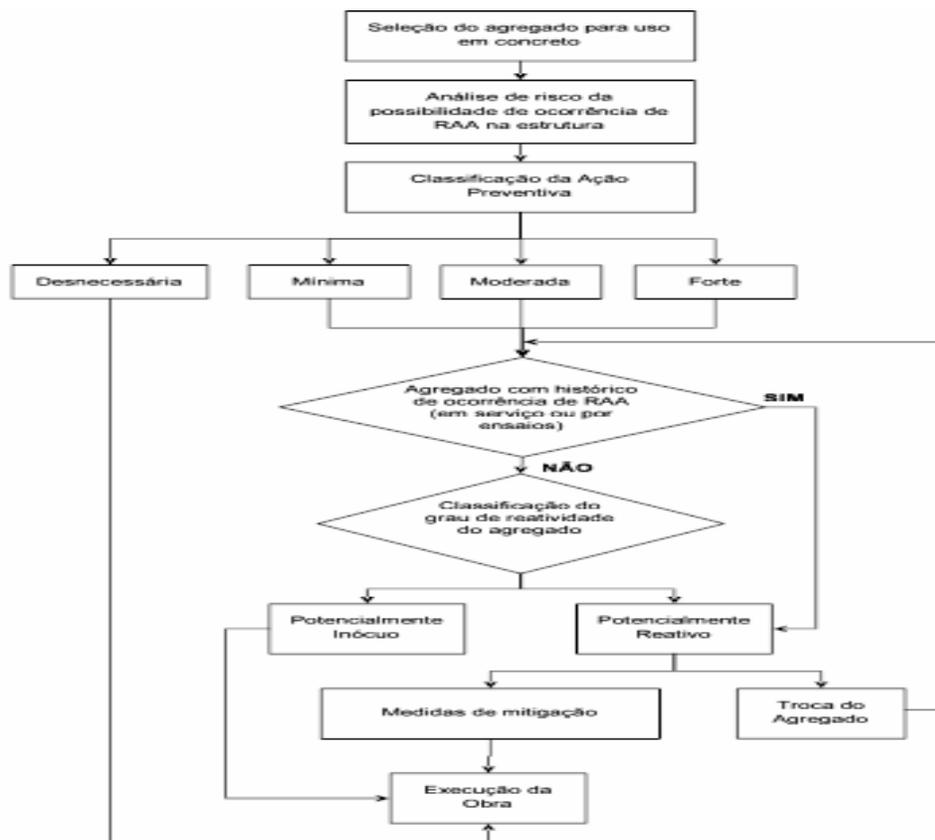


Figura 4.1. Fluxograma geral para uso do agregado em concreto (ABNT NBR 15577-1/2008).

Quando o risco de ocorrência da RAA for desprezível ou se tratar de estruturas provisórias, será desnecessária qualquer ação preventiva. Quando as condições ambientais, as quais a estrutura estiver exposta, indicar risco mínimo, as ações preventivas também serão mínimas, e por fim, quando se tratar de estruturas indicando forte risco, as ações preventivas serão fortes. O responsável técnico pela obra deverá classificar a ação preventiva necessária para a mitigação da RAA.

No quadro 4.1 estão alguns exemplos de classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição, esses exemplos são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de estruturas ou elementos estruturais de concreto. Manifestações patológicas e meios agressivos podem contribuir para acelerar o processo deletério indicado pela reação álcali-agregado (ABNT NBR 15577/2008).

**Quadro 4.1. Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição, (ABNT, 2008).**

| Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto | Estruturas provisórias <sup>a)</sup> |  | Estruturas ou elementos estruturais correntes <sup>b)</sup> |  | Estruturas especiais <sup>c)</sup> |   |
|--|--------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|---|
|  | Classificação da ação preventiva     | Exemplo de estrutura   | Classificação da ação preventiva                            | Exemplo de estrutura   | Classificação da ação preventiva   | Exemplo de estrutura  |
| Não maciço e seco <sup>d), e)</sup>                                      | Desnecessária                        | Edificações provisórias não expostas a umidade atmosférica   | Desnecessária   | Superestrutura de obras residenciais, comerciais, industriais e outras       | Mínima                             | Superestrutura de hospitais, estações, shopping centers, estádios e outros  |
| Maciço e seco <sup>d), e), f)</sup>                                      | Desnecessária                        | Edificações provisórias não expostas a umidade atmosférica   | Moderada  | Bases internas para equipamento pesado<br>Edifícios com revestimento externo | Forte                              |   |
| Não maciço e exposto a umidade ou em contato com água <sup>d), e)</sup>  | Desnecessária                        | Proteções de taludes rochosos com concreto projetado, fundações de edificações provisórias, caixas d'água, canteiro de obras | Moderada  | Postes, cruzetas, tubos e outros elementos similares de concreto             | Forte                              | Estruturas de obras de arte<br>Comportas de concreto.<br>Fundações de subestações<br>Pré-moldados externos e de galerias<br>Pavimentos externos<br>Elementos de fundações de grandes obras residenciais, comerciais e industriais |
|  |                                      |  | Forte   | Vigas de baldrame e elementos de fundações de edificações correntes          |                                    |   |
| Maciço e em contato com água <sup>d), e)</sup>                           | Mínima                               | Canteiro de obras<br>Ensecadeiras galgáveis ou integralmente em concreto<br>Fundações de edificações provisórias             | Forte   | Estádios<br>Estações de tratamento de esgoto<br>Estruturas de fundações      | Forte                              | Infraestruturas de obras de arte<br>Estruturas hidráulicas<br>Estruturas de usinas termelétricas, nucleares e eólicas   |

a) Estruturas provisórias são aquelas com curto período de vida útil de projeto. Para os efeitos da ABNT NBR 15577 (todas as Partes) considera-se que um curto período de vida útil de projeto corresponde ao máximo de cinco anos.

b) Estruturas correntes são consideradas as construções prediais, residenciais, industriais e comerciais em geral.

c) Estruturas especiais que englobam as obras com vida útil elevada, com grande responsabilidade estrutural, cuja ruína pode acarretar danos expressivos, grande perda de vidas ou dificultar o socorro às vítimas. Nesta categoria estão incluídas estruturas de grande porte, estruturas de aproveitamentos hidráulicos, usinas térmicas, instalações nucleares, obras de arte de engenharia e estruturas nas quais grandes reparos são impossíveis de serem realizados ou inviáveis do ponto de vista financeiro.

d) Elemento maciço é aquele cuja menor dimensão da Seção transversal é maior ou igual a 1 m (CSA.A23.2-27A). Esta limitação refere-se à possibilidade de reação devida à umidade interna do concreto, mesmo quando exposto a ambientes secos.

e) Para os efeitos da ABNT NBR 15577 (todas as Partes), considera-se que ambiente seco corresponde à ausência permanente de umidade em contato com o concreto da estrutura. Os elementos estruturais enterrados são considerados úmidos. Elementos estruturais revestidos não enterrados são considerados protegidos da umidade.

f) 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.

g) Elemento maciço em contato com água diretamente ou umidade proveniente do solo ou de rochas.

NOTA Os exemplos da Tabela 1 são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de estrutura ou elementos estruturais de concreto. Meios agressivos e manifestações patológicas podem contribuir para acelerar o processo deletério iniciado pela reação álcali-agregado.

A ABNT NBR 15577 (2008) preconiza que o agregado poderá ser aceito para uso sem avaliação de seu potencial reativo, quando a ação preventiva for desnecessária. Os demais níveis de prevenção indicam que a avaliação da reatividade dos agregados é necessária, pois meios agressivos e manifestações patológicas podem contribuir para acelerar o processo deletério iniciado pela reação álcali-agregado.

## **4.2. Avaliação da Reatividade do Agregado**

A realização de avaliações deve ser prevista, sempre que for necessário conhecer o potencial reativo dos agregados, e a partir dos resultados obtidos, aplicar os procedimentos apropriados. Tratar como reativo o agregado, quando não houver ensaios comprobatórios da natureza potencialmente inócua.

A ABNT NBR 15577/2008, não estabelece critérios sobre a avaliação e prevenção da reação álcali-carbonato a norma recomenda que essa, seja tratada através dos estabelecidos pelas normas CSA A23.2-14A e CSA A23.2-26A.

As diretrizes para avaliação do grau de reatividade potencial de agregados preconizadas pela ABNT NBR 15577/2008, em relação as reações: álcali-sílica e álcali-silicato devem seguir procedimentos para a verificação do grau da reatividade potencial do agregado, de acordo com a seqüência do fluxograma apresentado na Figura 4.2. A caracterização mineralógica e a análise petrográfica associadas aos ensaios de expansão em barras de argamassa e expansão em prismas de concreto fornecem informações importantes para a decisão quanto ao uso do agregado.

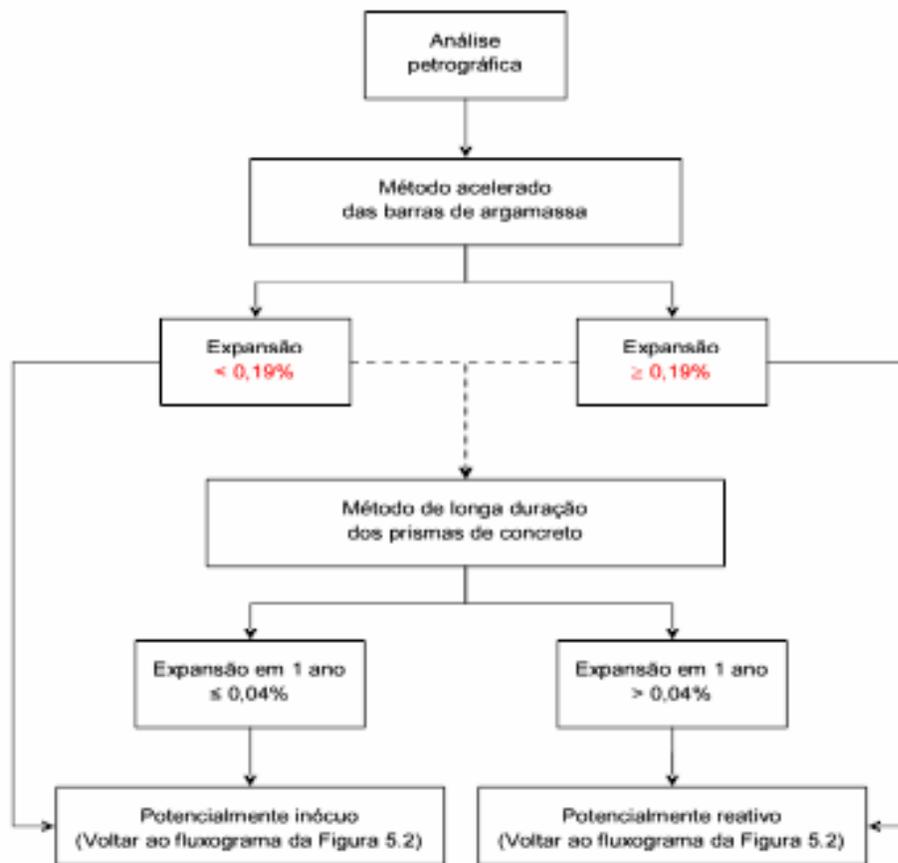


Figura 4.2. Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado.

### 4.3. Análise Petrográfica do agregado - ABNT NBR 15577-3

Segundo a ABNT NBR 15577-3/2008, a análise petrográfica é o primeiro passo na investigação das potencialidades reativas do agregado, pois fornece informações sobre a composição mineralógica, ou seja, a presença ou não de constituintes do agregado suscetíveis aos álcalis do cimento e seu porcentual. O ensaio é realizado em lâminas preparadas com o agregado e observadas em microscópio ótico.

Uma análise difere de um ensaio por seu caráter subjetivo e interpretativo, portanto a efetividade da análise petrográfica depende em larga escala da representatividade das amostras examinadas, da abrangência e exatidão da informação fornecida ao petrógrafo com relação à fonte e ao uso pretendido do material e depende principalmente da experiência e habilidade do petrógrafo em correlacionar esses dados com as informações da análise. Normalmente, o laudo de uma análise petrográfica, além da natureza e classificação da rocha, consta de exame macroscópico, no qual se verifica a cor e o tipo de textura.

As análises devem ser realizadas por pessoas qualificadas, com formação e experiência para aplicar as técnicas de reconhecimento das propriedades características de rochas e minerais, bem como descrever e classificar os constituintes de uma amostra de agregado.

Conforme a ABNT NBR 15577/2008, os procedimentos para a execução da análise devem seguir os métodos usuais de análise petrográfica, relacionados a seguir:

- Examinar macroscopicamente a amostra e classificá-la quanto ao tipo (cascalho, pedrisco, fragmento de rocha, testemunho de sondagem ou pedra britada);
- Avaliar as propriedades físico-mecânicas, classificando a rocha constituinte como: muito coerente, coerente, pouco coerente ou friável;
- Examinar macroscopicamente a rocha constituinte e registrar a cor e a estrutura (maciça, foliada, bandada ou outra);

A caracterização mineralógica e a análise petrográfica isoladas não são suficientes para avaliar a potencialidade deletéria devido à reação álcali-agregado, mas fornecem informações importantes para essa avaliação.

- Após examinar a seção delgada ao microscópio, registrar as seguintes características da rocha:

- Textura;

- Granulação (distinguir matriz e cimento se houver), classificando-a em grossa, média ou fina;
- Composição mineralógica: minerais principais e subordinados. Caso ocorram minerais opacos, o petrógrafo deve indicar o seu percentual (estimado ou por contagem) de ocorrência. Entre os opacos, os sulfetos merecem atenção especial, pois podem levar a manifestações patológicas alheias a reação álcali-agregado;
- Presença (ou ausência) de minerais e fases deletérias quanto à reação álcali agregado;
- Estimar o seu teor e, se pertinente seu modo de ocorrência, granulometria e relação com os outros minerais;
- Estimativa da quantidade de quartzo microgranular (menor que 0,5mm), conforme os campos: menor que 5%, entre 5 e 15% e maior que 15%;
- Sempre que presente feldspato em rochas deformadas, indicar a sua textura se mirmequítica, pertítica ou não aplicada;
- Estado microfissural, indicando, onde aplicável, se a microfissuração é ausente, moderada ou forte;
- Estado de alteração de rocha, classificando-a como sã, pouco alterada ou alterada e descrevendo, se necessário o estado de minerais específicos;
- Natureza (ígneia, sedimentar ou metamórfica) e classificação petrográfica da rocha.

Após a análise petrográfica da rocha, deve-se classificar o agregado quanto a RAA em potencialmente inócuo, caso não apresente minerais ou fases reativas em quantidade expressiva ou potencialmente reativo, caso contrário.

Os limites máximos de fases reativas geralmente adotados são: 5% (quartzo deletério), 3% (calcedônia), 1% (tridimita ou cristobalita), 3% (vidro vulcânico) e 0,5% (opala). Entretanto com base em experiência pessoal e nas feições presentes, o petrógrafo poderá admitir

limites distintos. No quadro 4.2, estão relacionadas rochas e minerais suscetíveis ao desenvolvimento da reação com álcalis.

**Quadro 4.2. Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado (ABNT NBR 15577/2008).**

| <b>Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica meta-estável e vidros vulcânicos</b>   |  |  |
|---|--|--|
| <b>Material reativo</b>   | <b>Rochas de ocorrência</b>  |  |
|   | <b>Rochas sedimentares</b>   | <b>Rochas vulcânicas</b>   |
| Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico  | Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito   | Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, alguns basaltos |
| <b>Rochas reativas contendo quartzo</b>   |  |  |
| <b>Material reativo</b>   | <b>Tipos de rocha</b>  |  |
| Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino<br><br>Quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão | Chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso<br><br>Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino<br><br>Rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado:<br><br>- rochas ígneas: granito, granodiorito e chamockito<br><br>- rochas sedimentares: arenito, grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo<br><br>- rochas metamórficas: gnaisse, quartzo-mica xisto, quartzito, filito, ardósia |  |

**4.4. Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado - ABNT NBR 15577-4**

A ABNT NBR 15577-4/2008 prescreve que, após a caracterização petrográfica do agregado, deve-se realizar o ensaio acelerado em barras de argamassa na presença de um cimento-padrão.

Esse método é utilizado para avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, por meio do monitoramento da expansão dimensional de barras de argamassa.

Nesse método o agregado deve ser processado com um mínimo de britagem, para o preparo da argamassa, quando necessário, de forma a produzir um produto classificado no quadro 4.3, conforme prescrito na norma.

Após o agregado ter sido classificado, cada fração é lavada com água corrente para remover o pó aderido e partículas finas do agregado. As frações retidas nas várias peneiras são secadas e cada fração, armazenada individualmente em recipiente limpo e fechado.

**Quadro 4.3. Granulometria requerida do material para ensaio (ABNT NBR 15577-4/2008).**

| Peneira com abertura de malha<br>(ABNT NBR NM ISO 3310-1) |         | Quantidade de material em massa |       |
|---|---------|---------------------------------|-------|
| Passante  | Retido  | %                               | g     |
| 4,75 mm   | 2,36 mm | 10                              | 99,0  |
| 2,36 mm   | 1,18 mm | 25                              | 247,5 |
| 1,18 mm   | 600 µm  | 25                              | 247,5 |
| 600µm   | 300 µm  | 25                              | 247,5 |
| 300µm   | 150 µm  | 15                              | 148,5 |

A norma preconiza que as barras argamassa, devem ser moldadas com proporção cimento/agregado de 1:2,25 (440g:990g) com relação a/c fixa igual a 0,47 com um cimento comprovadamente não mitigador da reação álcali-agregado e com expansão em autoclave inferior a 0,2%. Após 24 horas da adição da água, as barras são desformadas e colocadas

em recipiente para cura em água, o qual é gradualmente aquecido desde a temperatura ambiente até atingir  $(80\pm 2)^{\circ}\text{C}$ . As barras são conservadas nessa condição por 24h.

Após esse período de estabilização, as barras são removidas do recipiente de cura, uma de cada vez, e rapidamente medidos os seus comprimentos em sala climatizada a  $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , de modo a registrar a leitura inicial a  $80^{\circ}\text{C}$  (ABNT NBR 15577-4/2008). As medidas devem ter precisão de 0,002 mm, ser feitas dentro de  $15\pm 5$  segundos com o objetivo de não resfriar significativamente a argamassa, conforme preconiza o método.

Após a leitura inicial, as barras são colocadas em cura em solução aquosa de NaOH 1N a  $(80\pm 2)^{\circ}\text{C}$ , sendo medidos seus comprimentos periodicamente por, no mínimo, 28 dias, contados a partir da data de imersão em solução alcalina, e calculada a expansão linear.

A metodologia estabelece que a expansão média de três barras deve ser calculada pelo menos por três idades intermediárias antes dos 28 dias de cura agressiva, sendo que a repetibilidade é considerada satisfatória quando dois resultados dentro do mesmo laboratório, com os mesmos operadores e agregados, não diferirem mais que 8,3% da expansão média para valores acima de 0,10% aos 14 dias de cura agressiva (ABNT NBR 15577-4/2008).

Segundo a norma, os resultados devem ser expressos pela média de leituras de três barras, sendo os valores individuais com aproximação de 0,001% e a média, com aproximação de 0,01%.

Quando o resultado obtido nesse ensaio indicar expansão menor que 0,19 % aos 30 dias de idade, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. Caso se deseje a confirmação deste resultado, o método de longa duração dos prismas de concreto pode ser realizado prevalecendo o seu resultado.

Caso a expansão obtida no ensaio acelerado seja maior ou igual que 0,19 % aos 30 dias de idade, o agregado é considerado potencialmente reativo. Nesse caso, pode ser realizado o ensaio em prismas de concreto, conforme a parte 6 da norma ABNT NBR 15577/2008, para confirmação ou não da potencialidade reativa do agregado, prevalecendo o seu resultado. Opcionalmente, verificar a possibilidade de uso de outro agregado, reiniciando o processo de avaliação.

#### **4.5. Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método de longa duração - ABNT NBR 15577-6**

O ensaio para determinação da reatividade potencial do agregado através do método dos prismas de concreto, quando necessário, deve ser realizado na presença de um cimento-padrão durante um ano (ABNT NBR15577-6/2008).

Esse método de ensaio avalia, por meio da variação de comprimento de prismas de concreto, a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva na presença dos íons hidroxila associados aos álcalis (sódio e potássio).

É aplicado na avaliação do potencial deletério da reação álcali-sílica em combinações de materiais cimentícios/adições e um agregado potencialmente reativo.

Esse método visa a avaliar o comportamento tanto de agregados graúdos como miúdos, a partir de ensaios executados sob condições de cura laboratorial. Dessa forma, os agregados são preparados para atender uma determinada granulometria, de acordo com o quadro 4.4.

A NBR 15577-6 (ABNT, 2008), preconiza os seguintes parâmetros para a avaliação do potencial reativo dos agregados:

- Consumo de cimento:  $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ ;
- Relação água/cimento: 0,45;
- Módulo de finura do agregado miúdo:  $2,7 \pm 0,2$ ;
- Agregados, na condição, saturado superfície seca;
- Volume de agregado graúdo, no estado compactado seco:  $(70 \pm 2)\%$  do volume total do concreto;
- O cimento deve possuir finura de  $(4900 \pm 200) \text{ cm}^2/\text{g}$  e equivalente alcalino total de  $(0,90 \pm 10)\%$ , bem como, expansão em autoclave inferior a 20%;
- Dimensão máxima do agregado graúdo: 19mm;
- Água de amassamento com adição de NaOH, de forma a manter o equivalente alcalino da mistura em 1,25%.
- Quando da avaliação do potencial reativo de um agregado miúdo, deve se utilizar um agregado graúdo classificado como inócuo pela NBR 15577-4 (ABNT, 2008) e vice-versa;
- Teor de argamassa do traço:  $55 \pm 2\%$ ;
- O agregado miúdo deve ser ensaiado em sua granulometria original;
- No caso do agregado graúdo, se a fração granulométrica retida na peneira 19 mm, possuir composição e litologia diferente das demais, deve-se proceder à moagem desta fração e juntá-la as demais. Outra opção é ensaiar somente essa fração após a moagem, na granulometria do Quadro 4.4.

**Quadro 4.4. Granulometria requerida para o agregado graúdo. (ABNT, 2008).**

| Peneira com abertura de malha<br>(ABNT NBR NM ISO 3310-1) |        | Proporção<br>individual em<br>massa |
|---|--------|-------------------------------------|
| Passante  | Retido |                                     |
| 19,0mm  | 12,5mm | 1/3                                 |
| 12,5mm  | 9,5mm  | 1/3                                 |
| 9,5mm   | 4,75mm | 1/3                                 |

Deve-se realizar leituras, para o acompanhamento da variação do comprimento dos prismas, contadas a partir da moldagem dos prismas de concreto, nas idades de: 7 dias, 28 dias, 56 dias, seguido de leituras mensais dos 3 meses até 12 meses de ensaio. A norma sugere leituras adicionais quando necessárias, em intervalos de 2 meses a 6 meses.

Dados de pelo menos três prismas devem ser utilizados a qualquer idade de forma a constituir um ensaio válido para essa idade.

A diferença entre seu comprimento na idade considerada e seu comprimento inicial (leitura inicial) é representada pela variação de comprimento ou expansão de cada prisma de concreto numa determinada idade, e expressa em porcentagem do comprimento efetivo de medida, com aproximação de 0,001%. A expansão média dos prismas de concreto numa determinada idade deve ser expressa com aproximação de 0,01% (ABNT NBR 15577-6/2008).

Se o resultado obtido no ensaio dos prismas de concreto indicar expansão menor que 0,04 % na idade de um ano, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. No entanto, o agregado será classificado como potencialmente reativo, se o resultado obtido indicar expansão maior ou igual a 0,04 % na idade de um ano.

#### **4.6. Medidas de mitigação**

#### 4.6.1. Requisitos

A ABNT NBR15577/2008 estabelece algumas medidas de mitigação, geralmente, adequadas para o uso de agregados potencialmente reativos em concreto, conforme apresentado nos quadros 4.5 e 4.6.

Ensaio devem ser realizados, em periodicidade de amostragem de acordo com a ABNT NBR 15577-2, para acompanhamento da reatividade potencial dos diversos lotes de agregados provenientes de uma mesma jazida. Caso haja alteração na reatividade do agregado, novas medidas de mitigação podem ser necessárias, a partir de uma reavaliação.

Devem ser realizados ensaios comprobatórios da mitigação da expansão devida à reação álcali-agregado, pelos métodos estabelecidos nas ABNT NBR 15577-2 ou ABNT NBR 15577-6 com o uso de qualquer tipo de cimento normalizado em combinação ou não com adições normalizadas.

**Quadro 4.5. Medidas de mitigação (ABNT 2008).**

| 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)</sup> ou<br>2) Utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z, conforme ABNT NBR 11578, ou CP III, 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 e ou<br>2) Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60% de escória, conforme ABNT NBR 5135 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, 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 NM11-2, ABNT NBR MN 17 ou ABNT NBR 1456), na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto.  
<sup>b)</sup> Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>=0,658 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O.

**Quadro 4.6. Materiais inibidores da reação álcali-silica no concreto (ABNT 2008).**

| Material   | Requisitos da composição   |
|--|--|
| Cimento Portland tipo CP II E e CPP III  | Escória e 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, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menores que 0,04% em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.                          |
| Cimento Portland tipo CPII-Z e CPIV  | Materiais pozolânicos no cimento em teores suficientes para mitigar as expansões de argamassas com agregados potencialmente reativos a níveis inferiores a 0,10% aos 16 dias, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-5, ou menos que 0,04% em dois anos, quando ensaiados de acordo com a ABNT NBR 15577-6.                           |
| Silica ativa e metacaulim em combinação com qualquer tipo de cimento Portland  | Os teores necessários de silica 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, ou pelo ensaio prescrito na ABNT NBR 15577-6, sendo menor do que 0,04% em dois anos. |
| 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 da convencionais. |  |

#### **4.6.2. Avaliação da eficiência de materiais inibidores**

Em caso da ação preventiva de intensidade forte ou outras situações de interesse, a combinação entre os materiais cimentícios a serem utilizados na obra e o agregado potencialmente reativo deve ser testada pelo método acelerado em barras de argamassa (ABNT NBR 15577-5) ou pelo método dos prismas de concreto (ABNT NBR 15577-6).

Quando for previsto a utilização de sílica ativa ou metacaulim, essas adições normalizadas devem ser incorporadas à mistura em ensaio nos teores especificados para a obra.

##### **4.6.2.1. Ensaio acelerado para confirmação da mitigação de reação**

Quando as expansões obtidas no ensaio acelerado forem iguais ou superiores ao limite de 0,10 % aos 16 dias, são necessários novos ensaios, de forma a atender a esse limite a partir de novas misturas, podendo-se optar por uma ou mais das alternativas seguintes (ABNT NBR 15577-5):

- utilizar um tipo de cimento Portland apropriado para inibir a reação;

- incorporar ou aumentar os teores de sílica ativa ou metacaulim na barra de argamassa;
- trocar o agregado, quando o potencial reativo verificado for muito elevado ou quando não se conseguir comprovar a mitigação da reação com o uso de inibidores.

A mitigação da reação será comprovada quando o resultado do ensaio acelerado em barras de argamassa for menor que 0,10% aos 16 dias (ABNT NBR 15577-5: 2008).

#### **4.6.2.2. Ensaio de longa duração**

De acordo com a ABNT NBR 15577-6 (2008), quando as expansões obtidas no ensaio de longa duração forem iguais ou superiores ao limite de 0,04% em um ano pelo procedimento com a dosagem padrão, são necessários novos ensaios de forma a atender a esse limite a partir de novas misturas, podendo-se optar por uma ou mais das alternativas seguintes:

- utilizar um tipo de cimento Portland apropriado para inibir a reação;
- incorporar ou alterar teores de sílica ativa ou metacaulim no concreto para moldagem dos prismas;
- trocar o agregado, quando o potencial reativo verificado for muito elevado ou quando não se conseguir comprovar a mitigação da reação com o uso de inibidores.

Esse método também pode ser aplicado na investigação de combinações de agregados miúdos e graúdos para uma aplicação específica de concreto, bem como da combinação com o cimento e eventuais adições, não se dispondo, contudo, de dados estatísticos sobre limites máximos de expansão aceitáveis.

A mitigação da reação será comprovada quando o resultado do ensaio de longa duração em prismas de concreto preparados com os materiais inibidores da reação for menor que 0,04% aos dois anos, conforme apresentado no fluxograma da figura 4.3.

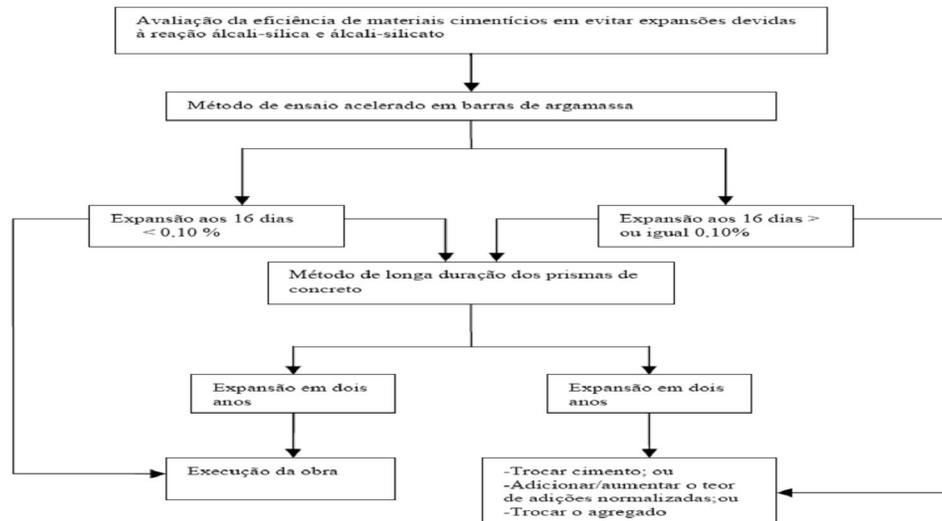


Figura 4.3. Fluxograma da avaliação da eficiência de materiais inibidores da reação.

#### 4.7. Análise final das informações obtidas na ABNT 15577/2008

Os resultados dos ensaios realizados informam se o agregado em estudo é potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

Quando for constatado que o agregado é potencialmente inócuo, a partir da avaliação realizada de acordo com as prescrições da ABNT NBR 15577/2008, seu uso em concreto pode ser aprovado pelo responsável técnico (RT da obra), desde que cumpridas as demais exigências da ABNT NBR 7211.

Caso a avaliação realizada indique potencial reativo na presença de álcalis e houver risco de manifestações patológicas na estrutura, o agregado pode ser utilizado, desde que seja possível comprovar a mitigação das reações expansivas através de ações preventivas, pois o seu uso sem aplicação de ações preventivas que comprovadamente garantam a

mitigação das reações expansivas pode acarretar danos estruturais que inviabilizem o uso na construção.

A partir do conjunto de informações obtidas, considerando: a análise do tipo da estrutura e sua condição de exposição ambiental, histórico do uso dos agregados, ensaios dos materiais e avaliação da eficiência das medidas mitigadoras da expansão, é possível minimizar o potencial de a estrutura vir a apresentar manifestações patológicas deletérias devidas à reação álcali-agregado.

## **5. CONCLUSÃO**

O crescente número de ocorrências de estruturas afetadas pela RAA, como: pontes, obras hidráulicas e infra-estrutura de prédios tornam pertinente incentivar a busca por soluções que impeçam o seu surgimento, pois embora não se tenha ainda uma solução corretiva definitiva, pode-se evitar que novas estruturas manifestem essa patologia utilizando métodos eficientes na prevenção, eliminando assim maiores gastos com manutenção e, em última instância, perda da capacidade operacional da estrutura.

Sendo assim, a ação preventiva é necessária para evitar danos decorrentes da reação álcali-agregado, estando ela intimamente ligada ao grau de risco de sua ocorrência em

função das condições de exposição e do tipo de estrutura ou elemento de concreto no qual o agregado será empregado.

Portanto, essa pesquisa objetivou ratificar através de revisão bibliográfica a importância de medidas de prevenção e mitigação, preconizadas na ABNT NBR 15577/2008, para se evitar a ocorrência da RAA. Apresentar suas diretrizes e requisitos, que auxiliam: na avaliação do comportamento do agregado em combinação com cimento e adições minerais (adições minerais, sejam elas adicionadas ao cimento ou a massa do concreto), quanto à reatividade potencial e direcionar as condições adequadas de uso desses agregados a fim de se evitar o desencadeamento da reação expansiva com o passar do tempo.

Diante do exposto, os resultados obtidos permitiram verificar que há necessidade de se divulgar o fenômeno da RAA, entre o meio técnico, e que a Norma Brasileira, apesar de apresentar diretrizes e requisitos objetivos, não esclarece aspectos, como:

- Monitoramento da temperatura, nos tanques com soluções de NaOH;
- Utilização de geradores de energia para eventuais quedas no fornecimento público;
- Controle da concentração de NaOH nos tanques de imersão.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *ASTM C150/05*: Specification for Portland cement. Philadelphia, 2005.

\_\_\_\_\_*ASTM C289/03*: Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method). Philadelphia: 2003.

\_\_\_\_\_.*ASTM C1260/05*: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-bar method). Philadelphia: 2005.

\_\_\_\_\_.*ASTM C1293/05*: Standard test method for concrete aggregates by determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. Philadelphia, 1995.

\_\_\_\_\_.*ASTM C1567/05*: Standard test method for determining the potencial alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method). Philadelphia, 2005.

AMO, D. G.; PÉREZ, C. B. Diagnosis of the alkali-silica reactivity potential by means of digital image analysis of aggregate thin sections. *Cement and Concrete Research*.. v. 31, p.1449-1454, 2001.

ANDRADE, T.; SILVA, J. J. R.; HASPARYK, N. P.; SILVA, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e gráudos comercializados 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. 1 CD-ROM.

ANDRADE, T. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na Região Metropolitana do Recife-PE. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2006, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

ANDRIOLO, F. R. Ensaio para avaliação da potencialidade dos materiais quanto a reação álcali-agregado e ações decorrentes. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1. 1997. Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p. 35- 43.

ANDRIOLO, F. R. Reação álcali-agregado: observação de âmbito internacional. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1. 1997. Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997.

ANDRIOLO, F. R. Agregado Deletério - Possibilidade(S) Segura(S) de Uso. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2006, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9774: Agregados – Verificação da reatividade potencial pelo método químico – Método de ensaio.* Rio de Janeiro: 1987.

\_\_\_\_\_.*NBR 12653: Materiais pozolânicos - Especificação.* Rio de Janeiro: 1992.

\_\_\_\_\_.*NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.* Rio de Janeiro: 2008.

\_\_\_\_\_.*NBR 15577-2: Agregados - Reatividade álcali-agregado - concreto.* Rio de Janeiro: 2008.

\_\_\_\_\_.*NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.* Rio de Janeiro: 2008.

\_\_\_\_\_.*NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.* Rio de Janeiro: 2008.

\_\_\_\_\_.*NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.* Rio de Janeiro: 2008.

\_\_\_\_\_.*NBR 15577-6: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.* Rio de Janeiro: 2008.

BICZOK, I. *Corrosion y protección del hormigón*. Trad de Emilio J. d'Ocon Asensi. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p.275-280.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA): *CSA A23.2-14A-00: Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 °C )*. Mississauga, 2000.

\_\_\_\_\_.*CSA A23.2-25A-00: Detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars*. Mississauga, 2000.

\_\_\_\_\_.*CSA A23.2-27A-00: Standard Practice to Identify Degree of Alkali- Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete*. Mississauga, 2000.

CHEN, H.; SOLES, J. A.; MALHOTRA, V. M. Investigations of supplementary cementing materials for reducing alkali-aggregate reactions. *Cement and Concrete Composites*. v. 15, p. 75-85, 1993.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. *Cement and Concrete Research* 5. p. 329-346. 1975.

COLLINS, C. L.; IDEKER, J. H.; WILLIS, G. S.; KURTIS, K. E. Examination of the effects of LiOH, LiCl and LiNO<sub>3</sub> on alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research, Elmsford*. v. 34, n. 13, p. 1403-1415, 2004.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. *The chemistry of alkali-aggregate reaction*. *Cement and Concrete Research*. v. 11, n. 3, p. 1-9, 1981.

FENG, C. X.; THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T. W.; BALCOM, B. J.; FOLLIARD, K. J. *Cement and Concrete Research*. v. 35, n. 9, p. 1789-1796, 2005.

FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; GROSBOIS, M.; LISELLA, R.; SHEHATA, M.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; THOMAS, M.; BAXTER, S. *The Accelerated Concrete Prism Test (60oC): variability of the Test Method and Proposed Expansion Limits*. In: 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. 2004, Beijing, China. Proceedings... Beijing, China, 2004.

FOURNIER, B.; BERUBÉ, A. *Alkali-Aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications*. Paper, Ottawa, 2000.

FURNAS. *Equipe de Laboratório de Concreto. Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades*. São Paulo: Walton Pacelli de Andrade. PINI, 1997.

GILLOTT, J. E. *Alkali-reactivity problems with emphasis on Canadian aggregates*. *Engineering Geology*. v. 23, p. 29-43, 1986.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro. Editora Bertrand Brasil. 2ª edição. 1994.

GRUBER, K. A.; RAMLOCHAN, T.; BODDY, A.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement and Concrete Composites*. v. 23, p. 479-484, 2001.

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

HASPARYK, N. P. *Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali- Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. 1999.

HOOBS, D.W. *Alkali-silica reaction in concrete*. London: Thotmas Telford, 1988. 183p.

KATAYAMA, T. How to identify carbonate rock reactions in concrete. *Materials Characterizations*. v. 53, p. 85-104, 2004.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: 1º SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986. São Paulo. *Anais...* São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986, p.127-138.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3., 1993. São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABCP, 1993. v. 1, p. 319-337.

KORMANN, A. C. M.; DAL MOLIN, D. C. C; PORTELLA, K. F. Uso de adições minerais em concretos submetidos a ensaios de reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004. Florianópolis. *Anais...* Florianópolis:IBRACON, 2004. 1 CD-ROM.

KUPERMAN, S. C. ; SALLES, F. M. ; PINFARI, J. C. ; CARNEIRO, E. F. A CESP e a detecção da reação álcali-agregado. In: 26º SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2005, Goiânia. *Anais...* Rio de Janeiro : CBDB, 2005.

KUPERMAN, S. C.; VIEIRA, S. R. S.; FERREIRA, W. V. F.; TIBA, R. Tentativas para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. *Anais...* Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997.

KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control. *Journal of Materials Science*. v. 38, p. 2027- 2036, 2003.

LOPES, L. E. *Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragem de concreto*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 2004. 157p.

MALVAR, L. J.; CLINE, G. D.; BURKE, D. F.; ROLLINGS, R.; SHERMAN, T. W.; GREENE, J. L. Alkali-Silica Reaction Mitigation: state of the art and recommendations. *ACI Materials Journal*. v. 99, n. 5, p. 480-489, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto - estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ed. IBRACON, 2008.

MO, X.; YU, C.; XU, Z. Long-term effectiveness and mechanism of LiOH in inhibiting alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. v. 33, p. 115-119, 2003.

MONTEIRO, J. P. M. Effect of aggregate deformation on alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*, v.98, n.2, 2001.

NEVILLE, A.M. PROPRIEDADES DO CONCRETO. TRADUÇÃO SALVADOR E. GIAMMUSO. 2ª ED. REV. ATUAL. SÃO PAULO: PINI,1997.

OBERHOLSTER, R.E.; DAVIES, G. An Accelerated Method for testing The Potential Alkali Reactivity of Silicious Aggregates. *Cement and Concrete Research*. vol. 16, p. 181-189, 1986.

OBERHOLSTER, R. E.; VAN AARDT, J. H. P.; BRANDT, M. P. *Durability of cementitious systems*. In: STRUCTURES AND PERFORMANCE CEMENT, 1983, London: P. Barnes, APPLIES SCIENCE PUBLISHERS LTD, 1983.

PAULON, V.A. *Reações álcali-agregado em concreto*. São Paulo, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1981. 125p.

PECCHIO, M.; KIHARA Y.; BATTAGIN A. F.; ANDRADE T. Produtos da Reação Álcali-Silicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife - PE. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006. Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

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

QUÍAN, G.; DENG, M.; LAN, X.; XU, Z.; TANG, M. Alkali carbonate reaction expansion of dolomitic limestone aggregates with porphyrotropic texture. *Engineering Geology*. v. 63, p. 17-29, 2002.

RAMLOCHAN, T.; THOMAS, M. D. A.; HOOTON, R. D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part II: Microstructural and microchemical investigations. *Cement and Concrete Research*. v. 34, p. 1341-1356, 2004.

SALLES, F.M.; KUPERMAN, S.C.; BERTOLUCCI, L.D.V. Ensaio acelerado para verificação da RAA em prismas de concreto. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006. Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

SWAMY, R. N.; AL-ASALI, M. M. Expansion of concrete due alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal*. v. 85, n. 5, p. 33-40, 1988.

SANCHEZ, L. F. M. *Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. 2008. 168p.

SILVEIRA, A. L.; GUIMARÃES, E. M.; LENHARO, S. L. R.; HASPARYK, N. P.; CHIOSSI, W. C.; BITTENCOURT, R. M. Investigação da reação álcali-agregado em rochas

carbonáticas. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2006, Rio de Janeiro. *Anais...* São Paulo: IBRACON, 2006. 1 CD-ROM.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade proveniente de rejeito industrial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: IBRACON, 2004. 1 CD-ROM.

STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. In: *Proceedings of American Society of Civil Engineers*. v. 66, n. 10. Dec. 1940, p. 1781-1811.

TIECHER, F. *Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 2006. 182p.

THOMAS, M. et al. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*. jun 2006.

VALDUGA, L. *Reação álcali-agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Estadual de Campinas. 2002. 213p.

VALDUGA, L. *Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado*. Porto Alegre, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007. 208p.

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*. v. 7, n.6, p.643-648, 1977.

VIVIAN, H. E. Studies in cement-aggregate reaction. XIX: The effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. *Australian Journal of the Applied Science*. v. 2, p. 488-494, 1951.

WANG, H. *Alkali-silica reaction: mechanism. Significance of chemical and mineral admixtures*. PhD (Thesis)-University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada. 1990. 330p.

WANG, H.; GILLOTT, J. E. Mechanism of alkali-silica reaction and the significance of calcium hydroxide. *Cement and Concrete Research*. v. 21, n. 4, p. 647-654, 1991.

WIGUM, B. J. "*Alkali-aggregate reaction in concrete - properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks*". PhD. Thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Norway, 1995. 227 p.