



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND

3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO

São Paulo (SP), 8 a 12 de novembro de 1993

DMP-

0865712

3º ANAIS

VOLUME 1

CO-PATROCÍNIO:



COMPANHIA CIMENTO PORTLAND ITAÚ
CIMENTO PORTLAND MATO GROSSO S.A.
CIMENTO TOCANTINS S.A.
CIMENTO ARATU S.A.

REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: MECANISMO, DIAGNOSE E CASOS BRASILEIROS
ALKALI-AGGREGATE REACTION: MECHANISM, DIAGNOSIS AND BRAZILIAN CASES

Geól. Yushiro Kihara* e

Engº Luércio Scandiuzzi**

*ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND
e INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - USP

**CONSULTOR

RESUMO

A reação álcalis-agregado é uma reação lenta e complexa, que, em condições favoráveis, gera expansões que podem comprometer a durabilidade das estruturas de concreto.

Alto consumo de cimento com álcalis, presença de agregados reativos, condições climáticas favoráveis e ausência de materiais pozzolânicos no concreto, são os principais fatores que interagem na ocorrência da reação álcali-agregado.

No Brasil, os exemplos de estruturas de concreto com reação álcali-agregado têm aumentado progressivamente nestes últimos 10 anos, registrando-se os seguintes casos: Barragem Apolônio Sales (Moxotó), Barragem de Joanes, Barragem de Paulo Afonso, Barragem de Pedras, Barragem de Billings/Pedra e bases de concreto no Nordeste (PE).

As reações observadas nesses concretos são do tipo álcali-silicato, onde o quartzo e o feldspato, deformados, são os constituintes principais responsáveis pela reação.

SUMMARY

Alkali-aggregate reaction is a slow and complex reaction that under favourable conditions can cause abnormal expansions and cracking in concrete.

High consumption of alkali rich cements, presence of reactive aggregates, favourable environmental conditions and absence of pozzolanic materials are the interacting factors that leads to the development of alkali-aggregate reactions.

The incidence of such reactions in Brazilian concrete structures has increased in the last 10 years. Many cases have been investigated: Apolonio Sales (Moxotó) dam, Joanes dam, Paulo Afonso dam, Pedras dam, Billing/Pedra dam and concrete foundations in Northeast.

Alkali-silicate was the type of reaction detected in this investigations and stressed quartz and felspars appear to be the reactive phases.

I INTRODUÇÃO

Analogamente à descoberta, na década de 70, da Síndrome da Deficiência Imunológica Adquirida - AIDS, sobre a qual são conhecidos sintomas, métodos de detecção e medidas preventivas mas que, uma vez instalada no organismo humano não há métodos eficazes de cura, porém somente medidas paliativas de prorrogação, por período limitado, da vida do infectado, o concreto manifestou sua *AIDS* no início da década de 40, conhecida por reação álcali-agregado.

Sobre a reação álcali-agregado são conhecidos métodos de prevenção (uso de pozolanas, por exemplo), sintomas (fissuração típica e deformações estruturais), métodos de comprovação da sua existência (análises macro e microscópicas). Porém, uma vez instalada, a sua *cura* é praticamente impossível.

No Brasil, os primeiros trabalhos abordando a reação álcali-agregado datam da década de 60, quando dos estudos dos agregados para construção da Barragem de Jupiaá⁽¹⁾, nos quais foi constatada a presença de minerais potencialmente reativos (calcedônia) no seixo rolado existente no leito do rio Paraná, nas proximidades do local da obra. Este fato levou as Centrais Energéticas de São Paulo - CESP, assim como outras entidades técnicas como a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a aprofundar os estudos relacionados à reação álcali-agregado.

Em 1985, no "16º Seminário Nacional de Grandes Barragens", foi divulgado o primeiro caso de barragem, no Brasil, com suspeita de reação álcali-agregado: a Usina Hidroelétrica Apolônio Sales de Oliveira (Moxotó), da CHESF⁽²⁾.

Em 1988, foi confirmada a presença da reação na Barragem de Abastecimento de Joanes II (BA)⁽³⁾. Já na década de 90, a (ABCP), estudando amostras de concreto em seus laboratórios, constatou a existência de estruturas com reação álcali-agregado (cinco barragens e uma base de equipamento de grandes dimensões).

Estas constatações têm provocado preocupações crescentes no meio técnico brasileiro, suscitando o interesse do mesmo tanto no conhecimento do problema, quanto na observação e análise das estruturas construídas sem medidas preventivas para o combate da reação álcali-agregado.

Como decorrência, suspeita-se de que o número de casos comprovados da existência da reação deva crescer consideravelmente nos próximos anos no Brasil.

Este trabalho tece comentários básicos sobre os mecanismos da reação e mostra metodologias de diagnose e medidas preventivas na construção de novas obras. Complementarmente mostra os resultados obtidos nos laboratórios da ABCP, quando da análise de amostras de concreto, extraídas de estruturas com suspeita de reação álcali-agregado.

2 ORIGEM DO ESTUDO DA REAÇÃO

As primeiras evidências da reação álcali-agregado em estruturas de concreto deterioradas foram descobertas na Califórnia - USA, nos anos de 1939 e 1940⁽⁵⁾. Constatou-se que a deterioração do concreto era devida à formação de um gel alcalino expansivo na superfície dos agregados, resultante da reação entre os álcalis solúveis do cimento (Na_2O e K_2O) e alguns tipos de minerais existentes nos agregados.

3 MECANISMOS DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é uma reação lenta e complexa que ocorre entre os álcalis ativos (solúveis) do cimento (podendo haver também outras fontes de fornecimento de álcalis) e algumas espécies de minerais presentes em algumas rochas usadas como agregados para concreto e que, dependendo de sua intensidade e do meio ambiente, pode provocar a deterioração do concreto. A reação manifesta-se através de um padrão típico de fissuração do concreto, deslocamentos estruturais provocados pela expansão, exsudação de gel e bordas escuras ao redor dos agregados.

A fissuração do concreto e a deformação da estrutura é devida, geralmente, à formação de um gel expansivo ao redor dos agregados cuja intensidade depende da interação entre a quantidade de álcalis disponíveis (solúveis), natureza, dimensão e teor de agregados reativos e condições ambientais do meio (umidade e temperatura).

Os mecanismos da reação são ainda pouco conhecidos devido à interação de vários fatores na própria reação e de outros que podem trabalhar como catalizadores ou inibidores da mesma.

As manifestações de sua presença no concreto ocorrem em frequências variáveis, que dependem dos elementos que interagem na mesma e do meio ambiente a que o concreto está exposto. Há casos constatados de manifestações em poucos meses após a concretagem e até com 30 anos após a construção da estrutura⁽⁶⁾. Como média, as primeiras evidências de deterioração do concreto são observadas no período de quatro a sete anos após a construção⁽⁷⁾.

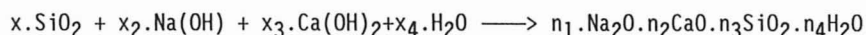
Por outro lado, têm-se constatado casos em que um mesmo agregado, utilizado em diferentes obras comporta-se de forma distinta quanto à reação álcali-agregado:

- em algumas obras comportam-se como inócuos e em outras podem manifestar-se como reativos;
- dentro de uma mesma estrutura, dependendo da dosagem do concreto e das condições de exposição, podem aparecer manifestações isoladas da presença da reação.

Atualmente são reconhecidos três tipos deletérios de reação álcali-agregado:

3.1 Reação Álcali-Silica

A reação álcali-silica é o tipo de reação expansiva mais rápida e conhecida⁽⁸⁾. Foi detectada pela primeira vez em 1940⁽⁵⁾ e compreende a reação entre os álcalis disponíveis (ativos) do cimento e alguns minerais do grupo da sílica (opala, calcedônia, cristobalita e tridimita) e certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais. A reação pode ser esquematizada da seguinte maneira:



A deterioração do concreto pela reação álcali-silica é decorrente do ataque do agregado reativo pelas soluções alcalinas presentes nos poros do concreto. Os álcalis atuam na basicidade das soluções dos poros, aumentando significativamente a alcalinidade (pH > 13), cabendo aos íons OH⁻ o papel ativo nas reações com os agregados reativos. Na borda dos agregados ocorre uma reação com formação de géis de silicatos alcalinos que, em contato com a água, podem exercer pressões hidráulicas importantes, superiores à resistência à tração do concreto⁽⁹⁾. Esse tipo de reação foi responsável pela deterioração do concreto das barragens de *Parker*/Califórnia⁽¹⁰⁾, *Stewart Mountain*/Arizona⁽¹¹⁾, *Matilija*/Califórnia⁽¹¹⁾ e *Val de La Mare*/Jersey⁽¹²⁾.

3.2 Reação Álcali-Silicato

A reação álcali-silicato é de natureza mais lenta e mais complexa que a reação álcali-silica. Compreende a reação entre os álcalis disponíveis do cimento e alguns tipos de silicatos eventualmente presentes em certas rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), rochas metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos e hornfels) e ígneas (granitos).

A lista de agregados rochosos susceptíveis de reatividade é longa e envolve fundamentalmente a presença de quartzo *tensionado* por processos tectônicos (metamórficos) ou de minerais expansivos da classe dos filossilicatos (vermiculitas, ílitas e montmorilonitas).

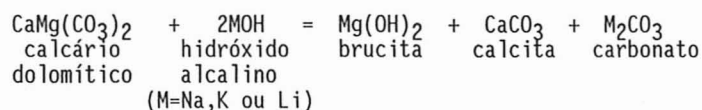
Este tipo de reação foi responsável pela deterioração do concreto na região da *Cidade do Cabo*/África do Sul, onde mais de 50% das estruturas de concreto, construídas desde 1950, vêm exibindo sinais de deterioração⁽⁸⁾. Concretos das barragens de *Steenbras*/África do Sul, *Malay Falls*/Canadá⁽⁹⁾, *Martin Dam*⁽¹²⁾ e *Drum Afterbay*/Estados Unidos⁽¹¹⁾, também foram afetadas pela reação álcali-silicato.

3.3 Reação Álcali-Carbonato

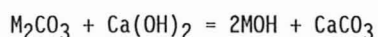
A reação álcali-carbonato ocorre entre os álcalis disponíveis do cimento e alguns agregados rochosos carbonáticos, como calcários dolomíticos argilosos. Caracteriza-se por não apresentar a formação de um gel expansivo e foi descrita pela primeira vez por SWENSON, (1957)⁽¹³⁾ em Kingston/Canadá.

SWENSON⁽¹³⁾ verificou que o calcário dolomítico utilizado como agregado do concreto, embora com baixa porosidade e boas propriedades físicas, era o responsável pela acentuada deterioração do concreto após 6 meses de sua execução. Petrograficamente, o agregado utilizado é um calcário dolomítico de granulação fina, constituído de dolomita e calcita em proporções equivalentes, e caracterizado por uma textura de cristais romboédricos de dolomita em uma matriz micrítica de calcita com argilominerais (ilita e clorita) disseminados.

A deterioração do concreto pela reação álcali-carbonato é devida à reação da dolomita com a solução alcalina, com conseqüente desdolomitização do calcário e enfraquecimento da ligação pasta-agregado. HADLEY (1964)⁽¹⁵⁾ propõe a seguinte reação:



O carbonato alcalino formado pode reagir com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, recuperando o hidróxido alcalino segundo a reação:



Neste tipo de reação não se forma o gel expansivo como na reação álcali-silicato e, admite-se que a ilita (argilomineral), sempre presente neste tipo de reação, contribua para o desenvolvimento de fenômenos de expansão. O mecanismo de expansão é uma ação combinada entre as reações de desdolomitização, que provocam a desestruturação da textura do calcário, e a presença de argilominerais que facilita a desagregação do agregado. Ensaio laboratoriais têm mostrado que quanto maior a dimensão do agregado calcário, em condições de umidade e alta temperatura, maiores são as expansões devidas a este tipo de reação⁽¹⁶⁾.

Dada a complexibilidade da reação e a inexistência de ensaios seguros para a avaliação da reatividade deste tipo de agregado, tem-se constatado que os ensaios mineralógicos e petrográficos são de grande valia, pois verificou-se que os calcários mais reativos são aqueles que apresentam textura fina característica, com relação calcita-dolomita próxima a 1 e presença de argilomineral na sua composição.

4 FATORES QUE INTERFEREM NA INTENSIDADE E DESENVOLVIMENTO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Diferentes são os fatores que interagem no mecanismo de atuação e expansão da reação álcali-agregado. A reação ocorre somente em determinadas situações quando há uma interação entre o agregado reativo, os álcalis disponíveis no concreto e o meio a que está submetido o concreto.

4.1 Teor de Agregados Reativos

Uma característica peculiar que regula a intensidade da reação é o conceito de *proporção péssima* desenvolvido por VIVIAN⁽¹⁷⁾. Segundo o referido autor, para cada agregado reativo existe um conteúdo definido de álcalis que produzirá uma expansão máxima (*Figura 1*). Fora desse limite, as expansões serão progressivamente menores. O mesmo conceito pode ser aplicado aos agregados reativos: aqueles que apresentam expansões máximas dentro de certos intervalos de frequência podem ser pouco expansivos fora desses intervalos. Esse fato torna difícil a avaliação do comportamento do concreto frente à reação álcali-agregado, a partir dos ensaios de previsão de reatividade do agregado.

4.2 Tipos de Agregados Reativos

Os agregados reativos são aqueles que possuem na sua composição fases mineralógicas que reagem com os álcalis disponíveis (ativos) do cimento provocando reações deletérias de expansão no concreto. As principais fases reativas são de composição silicosa: opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), calcedônia (SiO_2), cristobalita (SiO_2), tridimita (SiO_2), quartzo *deformado* (SiO_2), vidro vulcânico (composição essencialmente silicosa) e vidro sintético (composição essencialmente silicosa),
ilita $(\text{K}_{1-15}\text{Al}_4[\text{Si}_{7-6,5}\text{Al}_{1-15}\text{O}_{20}](\text{OH})_4)$, vermiculita
 $(\text{Mg,Ca})_{0,7}(\text{Mg,Fe,Al})_6[(\text{Al,Si})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ e montmorilonita
 $(\text{Ca,Na})_{0,7}(\text{Al,Mg,Fe})_4[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

A reatividade dos componentes silicosos com os álcalis depende de:

- . **granulação** - quanto mais finos os agregados, maior a superfície de reação sendo, portanto, mais reativos;
- . **estrutura cristalina** - quanto mais desorganizada e instável a estrutura, mais reativa é a fase. A reatividade dos vidros (amorfa), opala (amorfa), calcedônia (microcristalizada a criptocristalina), tridimita (metaestável), cristobalita (metaestável), quartzo *tensionado* (deformado), decorrente de suas estruturas, é maior que a do quartzo, de estrutura bem organizada (cristalina); e,
- . **conteúdo de água de cristalização** - ou mais precisamente de silanóis (grupos de SiOH) que conferem maior reatividade às fases, como por exemplo, as opalas e os filossilicatos de argila (alita, vermiculita, montmorilonita).

As fases mineralógicas reativas encontram-se distribuídas em diferentes proporções nas rochas e sedimentos (areia e cascalho) usados na construção, conferindo diferentes reatividades para materiais de mesmas características, mas de procedências distintas. Este fato evidencia a necessidade da realização de estudo petrográfico do agregado para cada obra a ser realizada, bem como a necessidade de organizar um banco de dados de desempenho de cada agregado utilizado no Brasil.

Dentre os agregados comumente utilizados no Brasil, possíveis de reatividade merecem atenção os cascalhos com calcedônia, granitos milonitizados, basaltos mais ricos em vidros, calcários silicosos, quartzitos, granulitos e gnaisses.

4.3 Conteúdo de Álcalis

O cimento é a fonte principal de álcalis do concreto, mas estes também podem introduzir-se no concreto por ação das águas superficiais (drenagem, represamento, etc) ou subterrâneas, bem como pela dissolução de componentes alcalinos dos agregados, das adições de cimento (pozolanas e escórias) ou de aditivos de concreto. O conteúdo adicional de álcalis introduzido no concreto, pode superar as expansões observadas em argamassas só com os álcalis do cimento⁽¹⁹⁾, tornando ineficaz a prática de utilizar cimentos com baixo álcalis para controlar a reação álcali-agregado no concreto.

Os álcalis do cimento, representados por Na_2O e K_2O , podem estar presentes sob a forma de sulfatos ou de soluções sólidas nas fases mineralógicas do clínquer portland. Os álcalis solúveis (ativos) do cimento variam de 10 a 60% do total de álcalis presentes no cimento⁽²⁰⁾. Para simplificação e unificação da nomenclatura costuma-se calcular o conteúdo de álcalis total como *equivalente alcalino em sódio* (equivalente de $\text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$). Geralmente o valor de 0,6% para o equivalente alcalino em sódio é considerado como valor limite para classificar um cimento como de alto e baixo conteúdo de álcalis.

Os álcalis em solução aumentam consideravelmente a alcalinidade (pH) das soluções de poros do concreto, aumentando a concentração dos íons OH^- , agentes responsáveis pela reação álcali-agregado⁽²⁰⁾. O pH da solução de poros atinge valores de 12,6 a 13,6 e mesmo de 13,9⁽¹⁸⁾. A presença de álcalis aumenta a concentração de íons OH^- na proporção da ordem de 10 a 15 vezes^(18e20). A alta alcalinidade da solução facilita a dissolução dos silicatos e favorece a precipitação de gel sílico-alcalino.

Em concretos com agregados potencialmente reativos, a norma ASTM (C-150) recomenda o uso de cimento com baixo teor de álcalis, limitado em 0,6% em equivalente em sódio. A limitação do teor de álcalis no cimento, sem considerar o teor de álcalis disponíveis (ativos) nas soluções dos poros e a quantidade de álcalis que é incorporada ao concreto, tem mostrado pouco significado, em função da observação de estruturas de concreto deterioradas mesmo com o uso de cimentos com baixo teor de álcalis. A tendência atual é limitar o conteúdo de álcalis totais ou solúveis por m^3 de concreto. Na Alemanha, recomenda-se que o conteúdo de cimento no concreto não exceda a $500\text{kg}/\text{m}^3$ para um cimento com limite superior de 0,6% em equivalente em sódio, o que corresponde a um conteúdo limite de equivalência em sódio de $3\text{kg}/\text{m}^3$ de concreto⁽²¹⁾. OBERHOLSTER e colaboradores (1983)⁽⁸⁾, fundamentados no estudo dos agregados sensíveis à reação álcali-silicato da África do Sul, estabeleceram os seguintes limites (FIGURA 2):

- a) acima de $3,8\text{kg}$ de equivalente em sódio disponível por m^3 de concreto: ocorrem reações expansivas;

- b) abaixo de 1,8kg de equivalente em sódio disponível por m³ de concreto: não ocorrem reações expansivas; e,
- c) entre 1,8 e 3,8kg de equivalente em sódio disponível por m³ de concreto, podem ocorrer reações expansivas (potencialmente reativo).

4.4 Condições Ambientais

As condições ambientais a que é submetido o concreto, representadas por variações de temperatura e umidade, têm influência significativa no comportamento do concreto com relação à reação álcalis-agregado. A exposição contínua ou cíclica à umidade favorece a solubilização e migração dos íons alcalinos na solução dos poros, aumentando a agressividade das soluções nos agregados. Condições de alta temperatura aceleram a hidratação do cimento e intensificam a agressividade das soluções alcalinas.

O concreto mantido em ambiente seco, em condições de baixa umidade, não é vulnerável à reação álcali-agregado, mesmo que contenha agregados reativos combinados com cimento com alto conteúdo de álcalis⁽²¹⁾. Pesquisadores japoneses^(22e23) estudando a influência das condições de umidade na reação álcali-agregado, observaram que, em condições de umidade relativa de 75 a 80%, as expansões observadas nos ensaios eram praticamente nulas e, entre 80 e 90%, as expansões observadas foram metade daquelas a 100%. Portanto, estruturas de concreto em contato com a água ou com sistemas deficientes de circulação de água (drenagem) são mais vulneráveis à reação álcali-agregado.

A exposição cíclica à umidade pode condicionar a concentração de álcalis em regiões localizadas do concreto, propiciando teores próximos à *proporção péssima*, permitindo a intensificação das reações de expansão. Este fenômeno pode ocorrer mesmo em concreto com baixo teor de álcalis, desde que este permita a migração dos íons.

5 DIAGNOSE DA REAÇÃO ÁLALI-AGREGADO

No exame de uma estrutura de concreto alterado e fraturado deve-se investigar todos os fatores possíveis que determinaram a deterioração do concreto. Muitas vezes, problemas de durabilidade de um concreto são resultantes de uma somatória de fatores e, idéias pré-concebidas das possíveis causas podem resultar em erros de avaliação, com proposição de reparos custosos e ineficientes, ou mesmo provocar riscos de acidentes no concreto. As recomendações⁽²⁴⁾, a seguir, devem ser consideradas:

- 1) no início de uma investigação, todos os mecanismos que poderiam provocar a deterioração do concreto devem ser considerados;
- 2) nenhuma causa simples ou comum pode ser eliminada até que todas as investigações concluem que não há nenhuma influência na deterioração; e,

- 3) evidências de reação álcali-agregado são encontradas em concretos onde a totalidade ou parte dos agregados são silicosos, mesmo que o concreto não apresente fissurações.

A reação álcali-agregado pode estar presente nos concretos, sem evidências claras de expansões e fissuramentos, indicando reação em estágio inicial de desenvolvimento ou reação incipiente, com baixo conteúdo de gel expansivo. As evidências de reação álcali-agregado em concreto deteriorado podem ser agrupadas em duas categorias:

5.1 Evidências de Campo

- deterioração do concreto devido à sua deformação e fraturamento;
- padrão de fissuramento não orientado, formando desenhos com formas quadrangulares a hexagonais (*foto 1*). Em concreto protendidos e armados, as fissuras tendem a ser orientadas e alongadas;
- ocorrência de eflorescência e exsudação de gel, geralmente em mistura com carbonatos;
- deslocamentos no concreto dificultando o funcionamento de comportas, rotação de pá, desalinhando e deformando estruturas metálicas, etc;
- descoloração do concreto.

5.2 Ensaios Laboratoriais

- agregados graúdos com bordas de reação (*foto 2*);
- poros do concreto com preenchimento total ou parcial de material de coloração branca (*fotos 2 e 3*), com composição do gel;
- microfissuramento da argamassa com preenchimento de material esbranquiçado (*foto 3*);
- agregados com fases mineralógicas potencialmente instáveis frente à reação álcali-agregado;
- produtos de reação álcali-agregado, de composição álcali-silicática, constituídos de gel expansivo e compostos cristalizados (*fotos 4 e 5*); e,
- complementarmente, podem ser realizadas análises químicas para determinar o conteúdo de álcalis e de cimento no concreto, bem como ensaios acelerados de expansão de barras de argamassa.

No estudo da reação álcali-agregado, além dos trabalhos de investigação e inspeção das estruturas de concreto, complementados por

informações da Geologia das áreas fontes dos materiais de construção e das condições ambientais do local, são realizados trabalhos laboratoriais fundamentados nas amostras extraídas de locais previamente investigados.

Os trabalhos laboratoriais objetivam detectar a ocorrência das feições relacionadas à reação álcali-agregado e fundamentam-se em métodos analíticos convencionais e modernos, como ensaios químicos do concreto, ensaios físicos-mecânicos (resistência à compressão, ensaios de expansão) e ensaios físico-químicos (microscopia de luz polarizada, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e análise por espectrometria de dispersão de energia).

6 MEDIDAS PREVENTIVAS

A única forma segura até então conhecida de se evitar a deterioração de estruturas de concreto em conseqüência da reação álcalis-agregado é a tomada de medidas resultantes do estudo dos materiais e dosagem dos concretos que serão utilizados na obra.

6.1 Estudo dos Agregados

Todas as possíveis fontes de rocha e/ou agregados passíveis de serem utilização nos concretos deverão ser amostradas de forma representativa para que, além dos ensaios normais de caracterização física e mecânica, sejam submetidas a ensaios que indicarão a potencialidade de sua reação com os álcalis. Não existe ainda um ensaio que, somente pelo seu resultado, possa assegurar que uma determinada rocha seja inócua ou reativa na presença dos álcalis. Portanto, é prudente que esta comprovação seja conseguida através de várias análises laboratoriais como indicado a seguir:

6.1.1 Análises petrográficas e mineralógicas

Indicarão se a composição mineralógica da rocha e/ou seu estado de deformação provocado por movimentações tectônicas podem torná-la reativa frente aos álcalis.

6.1.2 Ensaio acelerados em barras de argamassa e/ou concreto

São ensaios feitos em ambientes nos quais atuam os principais catalizadores da reação (temperatura e umidade), além da disponibilidade de teores variáveis de álcalis solúveis; indicam, de forma bastante promissora, através de medidas de expansão ao longo do tempo, de barras de argamassa e/ou concreto preparadas com a rocha em estudo, se a mesma é reativa com os álcalis.

Ensaio microscópicos executados sobre as barras, após o período do ensaio poderão evidenciar os produtos desta reação, caso existam, dando maior segurança na conclusão sobre a reatividade da rocha.

6.1.3 Ensaios químicos

Embora ainda utilizados e normalizados, são ensaios com tendência a ser descartados em razão da sua pouca confiabilidade comparativamente aos ensaios descritos no item 6.1.1 e 6.1.2.

De posse dos estudos laboratoriais e com base em estudos técnicos e econômicos que poderão indicar outra alternativa visando a prevenção da reação, deverá ser dada preferência ao uso daquelas fontes de agregados que se mostrarem inócuas nos ensaios petrográficos e de expansão de barras.

6.2 Caracterização do Cimento

Como é o produto que mais contribui com álcalis em uma mistura de concreto e, caso os agregados se mostrem potencialmente reativos, deverá ser dada preferência aos cimentos com menores teores de álcalis solúveis pois o mesmo está intimamente ligado à intensidade e longevidade da reação.

6.3 Uso de Materiais Pozolânicos ou Escórias Granuladas de Alto-Forno

A utilização de materiais pozolânicos ou escórias granuladas de alto-forno misturados ao cimento (tanto na moagem quanto durante a produção do concreto), tem se mostrado a forma mais eficaz de se evitar a deterioração do concreto devido aos efeitos expansivos da reação álcali-agregado.

As providências que devem ser tomadas quando se decide pela utilização desses materiais no combate aos efeitos da reação são:

- . comprovação da qualidade e eficácia do material disponível;
- . determinação do teor mínimo de adição ao cimento que garanta a inibição da reação;
- . determinação do teor de álcalis disponíveis do material e verificação se este teor não contribui para agravar o problema ao invés de saná-lo.

6.4 Uso de Aditivos

O uso de aditivos que contribuam para o aumento da compacidade e impermeabilidade do concreto é também um fator que minora a intensidade da reação já que a disponibilidade de água no interior do concreto é indispensável para o desenvolvimento da mesma.

Concretos com ar incorporado têm se mostrado também mais duráveis frente à reação, já que as micro-bolhas trabalham como *pulmões* para absorver o aumento de volume de gel, minimizando os esforços internos e conseqüentemente a fissuração.

Cabe lembrar que o uso de aditivos não garante, por si só, a durabilidade de estruturas afetadas por reações álcali-agregado.

7 OCORRÊNCIA DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NO BRASIL

No Brasil, a ocorrência de reação álcali-agregado é ainda muito pouco estudada (2,3,4,25e26) e documentada. Apenas a partir de 1985 foi que o meio técnico brasileiro tomou conhecimento da reação álcali-silicato nas barragens de Moxotó e Joanes II, ambas localizadas na região nordeste do País. O *Quadro 1* apresenta os casos de ocorrência de reação álcali-agregado em estruturas de concreto no Brasil.

QUADRO 1 - Estruturas de concreto com evidências e/ou suspeitas de reação álcali-agregado

Estrutura de Concreto	Estado	Ano de Construção	Natureza do Agregado	Natureza da Reação
Barragem de Itapacurá/DNOS*	PE	-	granito e gnaiss cataclados	suspeita de reação álcali-silicato
Base de concreto/BENJI	PE	-	granito e gnaiss	reação álcali-silicato
Base de concreto/Angelin	PE	-	rocha granitóide deformada e milonito	reação álcali-silicato
Base de concreto/White Martins instalação industrial	PE	1982	granito e gnaiss cataclados	reação álcali-silicato
Barragem de Paulo Afonso I a IV	BA/AL	1955-1979	granito, gnaiss e migmatito	reação álcali-silicato
Barragem de Moxotó	BA/AL	1977	granito, gnaiss e migmatito	reação álcali-silicato
Barragem de Pedras	BA	1970	granito	reação álcali-silicato
Barragem de Joanes II	BA	1971	gnaisse, migmatito e granulito	reação álcali-silicato
Barragem de Peti*	MG	1946	gnaisse	suspeita de reação álcali-silicato
Barragem de Billings/Pedra	SP	1926	granito	reação álcali-silicato
Barragem de Pedro Bight*	SP	1932	granito-gnaiss	suspeita de reação álcali-silicato

* não investigada, com suspeita de reação álcali-agregado

Embora a literatura técnica internacional, relacionada com a reação álcali-silicato, seja vasta, pouco se conhece a respeito da cinética e mecanismo da mesma; nos itens a seguir são mostrados os resultados dos estudos desenvolvidos na ABCP, todos envolvendo a reação álcali-silicato.

7.1 Características Gerais dos Concretos Estudados

As amostras estudadas - testemunhos extraídos com sonda rotativa - apresentam-se compactadas com agregados bem distribuídos, demonstrando boa técnica de dosagem e execução. Essas amostras são procedentes das seguintes obras:

- . Hidrelétrica de Moxotó - CHESF;
- . Hidrelétrica de Paulo Afonso - CHESF;
- . Barragem de Joanes II - abastecimento de água a Salvador (BA);
- . Base de equipamento - White Martins (PE);
- . Barragem reguladora de Billings Pedra - ELETROPAULO (SP);
- . Barragem de Pedras - CHESF.

Para todas as amostras estudadas o agregado miúdo é de origem natural (areia de rio), de composição quartzosa (>90%), não apresentando fases reativas (opala, calcedônia, etc).

O agregado graúdo (>4,8mm) consiste de pedra britada, caracterizado por granitos e rochas de composição granitóide, com alto grau de metamorfismo (gnaisse, migmatito e granulito). Rochas mais deformadas e milonitizadas foram observadas em pontos localizados.

As análises feitas nos agregados graúdos sob microscópio ótico mostraram que os mesmos são formados principalmente de feldspato potássico, feldspatos cálcico-sódicos e quartzo. Secundariamente ocorrem em proporções variáveis, biotita marrom, granada, anfibólio e piroxênio. Normalmente os cristais de quartzo e de feldspato aparecem tensionados e com extinção ondulante típica (*FIGURA 6*). A recristalização do quartzo é também freqüentemente observada.

7.2 Aspectos e Produtos Observados na Reação Álcali-Silicato

Nas amostras das barragens de Moxotó, Pedras, Joanes II, Paulo Afonso e Billings Pedras os produtos da reação não são observados de forma muito intensa devido ao fato de não terem sido extraídos testemunhos das regiões mais em contato com a água. Foram observadas bordas de reação em alguns agregados graúdos e poros preenchidos. O microfissuramento radial ao redor do agregado foi pouco observado e as fissuras estavam preenchidas com material secundário, similar àquele de preenchimento dos poros. A exsudação de gel foi também raramente observada.

O concreto da base de equipamentos da White Martins, apresentava intensa microfissuração com freqüentes bordas de reação ao redor dos agregados graúdos e grande preenchimento de poros. Embora com idade relativa baixa (10 anos de construção) este fato deve estar relacionado ao alto consumo de concreto (350kg/m^3) e ao ambiente a que a mesma

está exposta (altas temperaturas do Nordeste) e umidade (base semi-enterrada com lençol freático alto).

A intensidade e o efeito da reação álcali-agregado varia significativamente dentro de uma mesma obra, sendo mais expressivos naqueles locais sujeitos a gradientes significativos de umidade e temperatura. A ocorrência de agregados com bordas de reação ao lado de outros sem bordas indica que a cinética de reação não é homogênea no concreto e depende fundamentalmente da solução de poros e da reatividade de cada fragmento de rocha.

Análises complementares feitas com auxílio de microscópio eletrônico de varredura, equipado com espectrômetro de energia dispersiva, levaram à conclusão de que o principal produto da reação é um gel sílico-alcálico, tanto no estado amorfo, quanto exibindo variações de grau de cristalização e morfologia. Do ponto de vista composicional, o gel consiste de silício e secundariamente de cálcio, potássio e alumínio. O sódio aparece raramente e de forma inexpressiva, decorrente principalmente de sua baixa frequência no cimento.

Na análise da borda de reação observou-se que a parte externa do gel expansivo, que está em contato com a pasta de cimento, assim como aquele de preenchimento de poros e fissuras, mostra uma alta reação Ca/Si ($>1,0$)⁽²⁵⁾ e um baixo teor de potássio. O gel interno, mais em contato com o agregado, é comparativamente mais rico em álcalis e com menor relação Ca/Si (0,4 a 0,8)⁽²⁵⁾; mostra um intenso processo de *gretamento* (foto 4) durante a operação de secagem da amostra, sugerindo que o processo de expansão e fissuração do concreto esteja associada a este gel.

O desenvolvimento de fases cristalinas (FIGURA 5), com distintas morfologias (rosáceas, placoides, prismáticas e aciculares), ocorre preferencialmente no interior dos grãos de agregado, junto às regiões de descontinuidades (planos de quebra e de justaposição de cristais). Localmente nos poros e na borda de reação são observadas regiões de diferenciação do gel com formação de fases cristalinas. Embora essas fases cristalinas apresentem uma certa similaridade de composição química com o gel externo amorfo, elas são tipicamente mais ricas em álcalis (particularmente em potássio). Finalmente, pode-se assegurar que tanto do ponto de vista de composição química quanto de morfologia os produtos de reação analisados são similares àqueles descritos na literatura especializada.

7.3 Reatividade do Quartzo Deformado

Dentro do campo de conhecimento dos agregados reativos com os álcalis do cimento, uma das últimas constatações refere-se à reatividade do quartzo deformado por movimentações tectônicas. Os granitos, até recentemente considerados rochas inertes, passaram a ser considerados potencialmente reativos quando têm em sua composição quartzo deformado. A contribuição do feldspato neste tipo de reação foi investigada por pesquisadores indianos. Durante os estudos das amostras de concreto de barragem de Pedras⁽²⁵⁾, através de microscopia eletrônica, pôde-se concluir que o feldspato alcalino constituía-se em fase reativa pois esta fase mineral desenvolveu produtos de reação com

os álcalis, similares àqueles observados no quartzo. Os produtos resultantes da reação do feldspato são mais ricos em alumínio.

O quartzo e o feldspato alcalino deformados, constituintes de agregados rochosos intensamente deformados e cisalhados (milonitizados), são os principais responsáveis pela reação álcali-silicato, de natureza mais lenta e complexa que os outros tipos de reação.

8 CONCLUSÕES

A reação entre os álcalis do cimento (e/ou de outras fontes) com os agregados vem se tornando um dos maiores desafios para os tecnólogos, mineralogistas e químicos envolvidos com a execução e durabilidade das estruturas de concreto.

O aprofundamento nas pesquisas, aliado à constatação cada vez mais freqüente de estruturas com problemas de funcionalidade e durabilidade conseqüentes deste tipo de reação, tem mostrado uma abrangência cada vez maior de tipos de rocha passíveis de reagir com os álcalis.

No Brasil, que teve o seu grande auge de desenvolvimento, na construção de obras hidráulicas entre as décadas de 50 a 80 este assunto foi tratado de forma isolada por algumas empresas e/ou técnicos.

Complementarmente, a falta de divulgação e de pesquisas mais aprofundadas gerou uma *falsa* convicção de que os agregados reativos se limitavam apenas aos seixos rolados com minerais do tipo calcedônia e opala.

Os resultados dos estudos de algumas obras brasileiras aqui divulgados, mostram que a reação caracterizada é do tipo álcali-silicato e que o problema é muito mais complexo e amplo do que se imagina. Hoje há consenso de que basaltos, granitos, etc., podem se constituir em potenciais agregados para reagir com os álcalis do cimento.

Alerta-se, portanto, o meio técnico nacional, para uma ampla campanha de esclarecimentos técnicos sobre a durabilidade do concreto, particularmente sobre a reação álcali-agregado, os procedimentos preventivos e a análise de obras prontas que possam ter sua durabilidade comprometida pelo fenômeno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - GITAHY, H.S. O problema dos agregados para os concretos da barragem de Jupia. São Paulo: IPT, 1963.
- 2 - SILVEIRA, J.F., DEGASPARE, J.C., CAVALCANTI, A.J. Problemas decorrentes da reatividade álcali-agregado na usina hidroelétrica Apolônio Sales (Moxotó). In: **Seminário Nacional de Grandes Barragens**, 16a., Belo Horizonte, 1985. p.429-461, v.1.
- 3 - KIHARA, Y., ZAMPIERI, V.A., Deterioração de um concreto pela reação álcali-agregado; aspectos microestruturais por microscopia eletrônica de varredura. In: **Micromat 88. Simpósio Brasileiro de Microscopia Eletrônica e Técnicas Associadas na Pesquisa de Materiais**, São Paulo, 1988, p. 5-8.
- 4 - PIMENTA, M.A., FONTOURA, J.T.F., SCANDIUZZI, L. Investigações e estudo da reação álcali-agregado nas estruturas de concreto da barragem de Joanes II. In: **INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). Reunião anual sobre recuperação de estruturas de concreto**, 31a., São Paulo, 1989, v.1, p.95-115.
- 5 - STANTON, T.E. Influence of cement and aggregate on concrete expansion. **Engineering News-Record**, Chicago, v. 124, n.5, p. 171-173, Feb. 1940.
- 6 - DIAMOND, S. Chemical reactions other than carbonate reactions. In: **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials**. Philadelphia, 1978, p. 708-721(STP-169B).
- 7 - DAVIS, D.E. Reaction alcali-agregado. **Revista IMCYC**, México, v. 18, n. 117, p. 31-40, Ene. 1981.
- 8 - OBERHOLSTER, R.E., VAN AARDT, J.M.P., BRANDT, M.P. Durability of cementitious systems. In: **BARNES, P. Structure and performance of cements**. London: Applied Science, 1983, p. 380-397.
- 9 - POITEVIN, P., REGOURD, M. Durabilité des bétons, cas des granulats réactifs. **Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, Paris, n. 413, p.110-143, Mars/Avr. 1983.
- 10 - MEISSNER, H.S. Cracking in concrete due to expansive reactions between aggregate and high-alkali cement as evidenced in Parker Dam. **American Concrete Institute, Proc.**, Detroit, v. 37, p. 549-568, Apr. 1940.
- 11 - TUTHILL, L.M. Alkali-silica reaction; 40 years later. **Concrete International**, Detroit, v. 4, n. 2, p. 32-36, Apr. 1982.

- 12 - MATHER, K. Condition of concrete in Martin Dam After 50 years of service. *Cement, Concrete and Aggregates*, Philadelphia, v. 3, n.1, p. 53-62, Summer, 1981.
- 13 - SWENSON, E.G. A reactive aggregate undetected by ASTM tests. *American Society for Testing and Materials, Bulletin*, Philadelphia, v. 57, n. 226, p. 48-51, Dec. 1957.
- 14 - -----, GILLOTT, J.E. Characteristic of kingston carbonate rock reaction. In: U.S.A, Highway Research Board. *Concrete quality control, aggregate characteristics, and the cement-aggregate reaction*. Washington, D.C., 1960. (HRB-275).
- 15 - HADLEY, D.W. Alkali-reactive carbonate rocks in Indiana; a pilot regional investigation. In ESTADOS UNIDOS. Highway Research Record. *Symposium on alkali-carbonate rock reactions*. Washington, D.C., 1964, p. 196-221.
- 16 - WALKER, H.N. Chemical reactions of carbonate aggregates in cement past. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *Significance of testes and properties of concrete and concrete-making materials*. Philadelphia, 1978. p. 722-743 (STP-169B).
- 17 - VIVIAN, H.E. Studies on cement-aggregate reaction, the effect on mortar expansion of the particle size of the reactive component in the aggregate. *Australian Journal of the Applied Science*, Melbourne, v. 2, p. 488-494, 1951.
- 18 - LESAGE, R., SIERRA, R. Le point sur les réactions alcalis-granulats dans les bétons hydrauliques. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n. 90, p. 103-105, Juil/Août 1977.
- 19 - NAKANO, K., KOBAYASHI, S. NAGAOKA, S. Influence of reactive aggregate and alkali compounds of expansion of alkali-silica reaction. In: *INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 8th*, Rio de Janeiro, 1986.
- 20 - DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms: alkalies in cements and concrete pore solution. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, v. 5, n. 4, p. 329-346, Jul/Ago 1975.
- 21 - DAVIS, D.E, Reaccion álcali agregado. *Revista IMCYC*, México, D.F., v. 18, n. 117, p. 31-40, 1981.
- 22 - TOMOSAWA, F., TAMURA, K. ABE., M. Influence of water content on concrete on alkali-aggregate reaction. In: *INTERNATIONAL Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 8th*, Tokio, 1989, p. 881-885.

- 23 - KURIHARA, T., KATAWAKI, K. Effects of moisture control and inhibition on alkali silica reaction. In: **INTERNATIONAL Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 8th**, Tokio, 1989, p. 629-634.
- 24 - BRITISH CEMENT ASSOCIATION (BCA). **The diagnosis of alkali-silica reaction.** Wexham Springs, 1988.
- 25 - ZAMPIERI, V.A., KIHARA, Y. SCANDIUZZI, L. The alkali-silicate reaction in some brazilian dams. In: **INTERNATIONAL Congress on the Chemistry of Cement, 9th**, New Delhi, 23-28 Nov. 1992.
- 26 - CAVALCANTI, A. J. C. T., SILVEIRA, J.F.A. Investigations on the Moxotó powerhouse concrete affected by alkali-silica reaction In: **INTERNATIONAL Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 8th**, Tokio, 1989, p. 797-802.

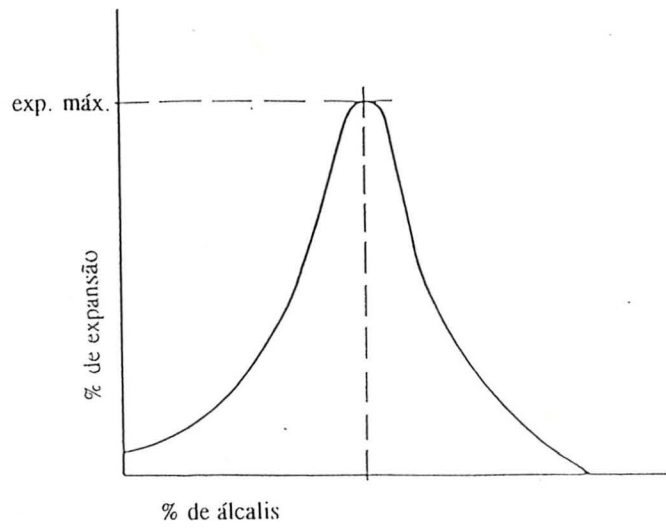


FIGURA 1 - Curva teórica da concentração peggima

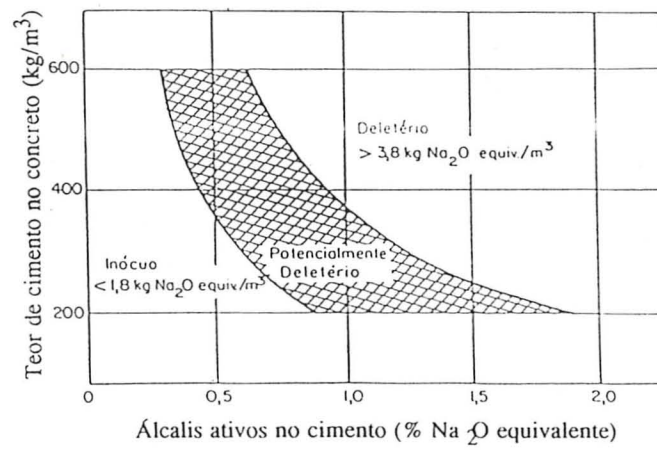


FIGURA 2 - Relação entre o conteúdo de álcalis ativos do cimento, teor de cimento do concreto, teor de álcali do concreto e reação álcali-agregado potencial resultante

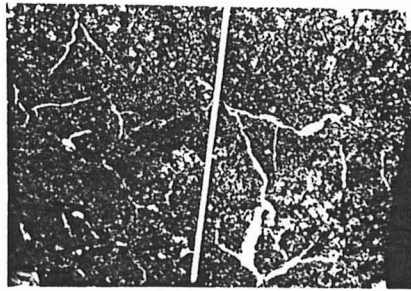


FOTO 1: Concreto do vertedouro da barragem de Joanes(BA) com padrão de fissuramento e exsudação de gel nas fissuras, decorrente de reação álcali-silicato.

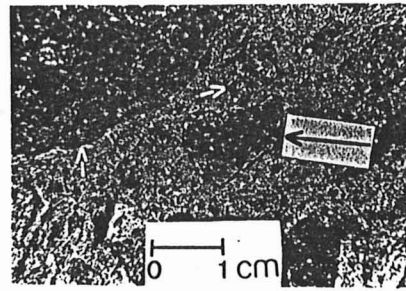


FOTO 2: Concreto da Barragem, de Paulo Afonso(BA) com agregados com bordas de reação.

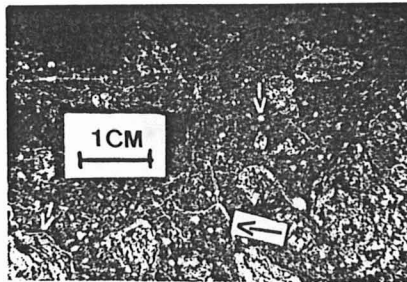


FOTO 3: Microfissuramento não orientado da argamassa da base de concreto/White Martins. Os poros e as fissuras encontram-se preenchidos com material branco (carbonato e gel).

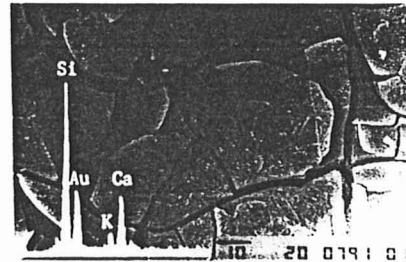


FOTO 4: Detalhe de gel expansivo gretado de composição álcali-silicática do concreto da barragem de Pedras(BA)⁽²⁵⁾. Imagem obtida por MEV com EDS.

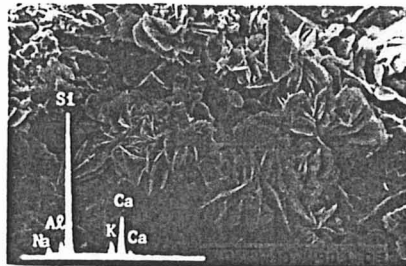


FOTO 5: Morfologia típica de produto de reação cristalizado na forma de rosáceas de composição álcali-silicática do concreto da barragem de Joanes(BA)⁽²⁵⁾. Imagem obtida por MEV com EDS.



FOTO 6: Cristal de quartzo (Qz) deformado e fraturado em granito milonitizado do concreto da barragem de Pedras(BA)⁽²⁵⁾. Observa-se, em nicóis cruzados, a extinção ondulante do quartzo deformado. Imagem obtida por microscopia de luz transmitida polarizada.