

Investigação da Reação Álcali-Agregado em Concretos de UHE's.

N. Hasparyk, FURNAS; M. Gomides, UFRGS; A. Silveira, FURNAS;
R. Bittencourt FURNAS*

Resumo- A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno patológico que ocorre no concreto, principalmente em barragens, e pode desencadear problemas em nível estrutural e operacional. Dependendo das condições em que a estrutura de concreto está exposta, esta reação gera expansões que podem ser observadas em diferentes idades a partir da sua instalação, dependendo também do grau de reatividade do agregado.

Este trabalho apresenta parte de um amplo estudo desenvolvido dentro do Programa de P&D da ANEEL, ciclo 2001-2002, contemplando resultados de ensaios realizados em testemunhos de concreto extraídos da galeria de drenagem do vertedor da UHE Furnas com o objetivo de avaliar a RAA. O programa experimental envolveu desde investigações macroscópicas até microscópicas com o objetivo de diagnosticar o problema da deterioração devida a RAA e verificar o mineral reativo presente no agregado além de ensaios de expansão em laboratório para determinar possíveis expansões residuais. Os resultados indicaram que os concretos procedentes da galeria de drenagem estão atacados pela RAA possuindo ainda algum potencial para expandir.

Palavras Chave: Deterioração – Expansão - Gel – Microscopia - Reação álcali-agregado

I. INTRODUÇÃO

O concreto pode estar sujeito a diferentes tipos de deterioração, sendo que os processos envolvidos podem ser subdivididos em químicos, físico-mecânicos, eletroquímicos e biológicos. A RAA é um processo químico de deterioração que pode ocorrer no interior do concreto afetando o seu desempenho e durabilidade.

A Reação Álcali-Agregado (RAA) pode ser definida como “*um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. 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*”. [1]

Segundo Mehta; Monteiro [2], as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e elasticidade de um concreto afetando, por conseguinte, a sua durabilidade.

As manifestações mais comuns verificadas em estruturas de concreto atacadas pela RAA são fissurações tipo “mapa”, exsudação de gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento de poros com material branco ou vítreo, microfissuração e descoloração do concreto [3].

A RAA teve seu marco em meados de 1940, quando Stanton foi capaz de interpretar este processo como sendo uma reação deletéria que ocorria internamente entre os constituintes do concreto, a sílica do agregado e os álcalis do cimento, dando o nome de reação álcali-agregado. Segundo constatações experimentais realizadas por Stanton em 1940 [4], a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causando fissurações similares àquelas observadas em diversas estruturas reais afetadas na Califórnia, durante 1920 e 1930. Em seguida (1941), Blanks e Meissner [5] apresentaram a deterioração da barragem Parker Dam pela RAA.

Logo após a descoberta da RAA, diversos pesquisadores passaram a investigar este fenômeno patológico em outros países, havendo inicialmente uma busca crescente na identificação das formas minerais presentes nos agregados que pudessem ser consideradas reativas. Segundo Poole [5], entre os diversos pesquisadores de destaque no entendimento da reação encontram-se Swenson do Canadá, Idorn da Dinamarca e Vivian da Austrália. De qualquer forma, foram vários os cientistas e tecnólogos que se motivaram a estudar o assunto, contribuindo tanto no que diz respeito ao processo químico envolvido e a identificação dos minerais reativos, como no campo das consequências e fatores intervenientes, com a identificação de casos reais de estruturas afetadas por esta patologia.

De acordo com Taylor [6], a deterioração devida à RAA pode ocorrer em questão de dias, ou apenas após anos; já Poole [5] comenta que a reação normalmente leva de 5 a 12 anos para se desenvolver. Biczok [7] apresenta um caso de extremas expansões e fissuração após sete anos de construção (SE Jutlandia). O tempo necessário para se observar indícios da RAA ou danos em uma estrutura depende muito de vários fatores, destacando o tipo e proporcionamento dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel (produto da reação formado), a temperatura, a umidade entre outros fatores [5, 7, 8, 9].

Ressalta-se que as principais causas da instalação da RAA são a presença, no agregado, de minerais reativos e álcalis

N. Hasparyk. Eng. Civil, Doutora, Trabalha no Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

M. Gomides. Eng. Civil, Doutoranda da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A. Silveira. Geóloga, MSc. Trabalha no Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

R. Bittencourt. Eng. civil. Trabalha no Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A.

no cimento, entretanto, influências externas como a umidade e temperatura são condicionantes do processo deletério [6, 7, 8].

O desenvolvimento deste fenômeno patológico no concreto tem ocasionado a degradação e a desativação de diversas estruturas, tais como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas [2]. Por exemplo, tem-se hoje relatado no meio técnico mais de 140 casos de barragens afetadas pela RAA. Nas estruturas em que se encontram instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos, como comportas, geradores e turbinas, os problemas causados pela RAA passam a ter uma maior dimensão e os custos decorrentes da manutenção e reparo são, na maioria das vezes, bastante elevados. Atualmente o fenômeno passou também a ser diagnosticado em fundações de edificações no Brasil, mais especificamente em Recife, desafiando a engenharia nacional.

Em relação aos efeitos deletérios provocados pela RAA, destacam-se aqueles que afetam o concreto, propriamente dito, e aqueles que podem interferir no sistema operacional de uma usina hidroelétrica. Os principais efeitos relatados no meio técnico estão agrupados a seguir [3]:

- grande incidência de fissuração na superfície do concreto e entre camadas de concretagem;
- deslocamentos na superfície do concreto;
- perda de estanqueidade;
- descolamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados;
- movimentação (abertura e/ou deslocamento relativo) de juntas de contração;
- abertura de juntas de construção, com fissuras horizontais;
- movimentação/desalinhamento das superfícies livres (ex: alteamento da crista da barragem e soleiras de vertedouros, deflexões para montante nas estruturas de barragens);
- travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (ex: comportas, turbinas, eixos, pistões, etc).

Apesar deste fenômeno ter sido descoberto há mais de 60 anos [4], ainda existem grandes dificuldades de entender melhor os mecanismos envolvidos e controlar a ação deletéria da RAA já instalada no concreto. Uma vez iniciada, ainda não se dispõe de uma maneira totalmente eficiente de interromper a evolução da RAA, e a conseqüente expansão, em qualquer tipo de estrutura de concreto.

Alguns procedimentos de reparo atualmente utilizados têm o objetivo de restringir a penetração de água, como aplicação de agentes hidrófobos (impregnantes/penetrantes), selantes, por meio de pinturas, por exemplo, ou impermeabilização com membranas; outras soluções de reparo são os reforços estruturais, que tem o objetivo de impedir as deformações, ou mesmo procedimentos relacionados a cortes na estrutura com o objetivo de liberar as deformações em determinadas direções. As soluções a base de lítio tem sido também estudadas, porém ainda existem grandes questões a serem esclarecidas

II. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental envolveu desde investigações macroscópicas até microscópicas em testemunhos de concreto com o objetivo de diagnosticar o problema da deterioração devida a RAA e verificar o mineral reativo presente no agregado, além de ensaios de expansão em laboratório para determinar possíveis expansões residuais.

Com o objetivo de compor as amostras para ensaio, foram realizadas várias inspeções na superfície do concreto da galeria de drenagem do vertedor da UHE Furnas. Após esta inspeção, foram definidas três regiões distintas, com características variadas para se proceder a perfuração de sondagem e extração dos testemunhos cilíndricos de concreto por meio de sonda rotativa a diamante com circulação direta de água, com dimensões aproximadas de 15cm x 30cm, conforme croqui apresentado na Figura 1. Duas regiões representavam o concreto da parede da galeria no sentido montante (C1 e C2) e uma no sentido jusante (C0). Definiram-se as classes a partir do nível de manifestações patológicas, sendo assim, classe 0 representa o concreto sem inícios da RAA instalada, já as classes 1 e 2 apresentam sintomas da reação, porém em graus distintos, sendo a classe 1 menos deteriorada e a classe 2 mais deteriorada. A partir dos vários testemunhos extraídos, foram selecionados 6 testemunhos para compor as análises macro e microscópicas e 12 testemunhos para os ensaios de expansão.

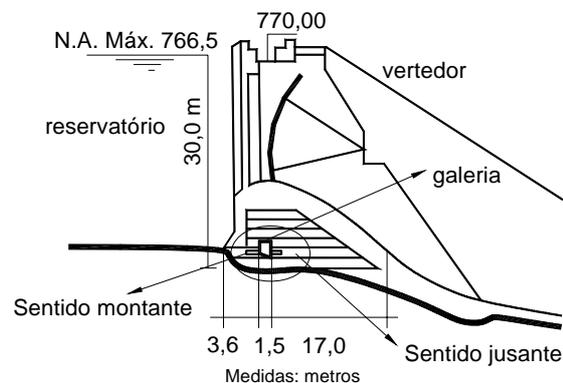


Figura 1. Seção em corte do vertedor - detalhe dos furos de extração (sentido montante/jusante) nos blocos de concreto da galeria de drenagem da UHE Furnas.

A seguir estão detalhadas as três etapas experimentais realizadas e apresentadas no presente trabalho.

A. Análises Macroscópicas

Os testemunhos extraídos foram submetidos a uma inspeção visual criteriosa em laboratório. Dentro de cada Classe (C0, C1 e C2) as amostras foram inspecionadas individualmente a olho nu e através de lupa com o objetivo de registrar as possíveis características (sintomas) presentes relativas a RAA, tais como:

- poro contendo material em seu interior;
- fissuras (tanto na argamassa quanto nos agregados);
- bordas de reação;

- manchas escuras na argamassa ou em torno dos agregados;
- descolamentos entre o agregado e a pasta entre outras.

B. Análises Microscópicas

Com o objetivo de verificar os minerais reativos presentes nos agregados e diagnosticar precisamente a RAA nos testemunhos de concreto extraídos através da formação de seus produtos, três testemunhos foram selecionados para serem investigados através da microscopia ótica e seis por microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

O microscópio ótico empregado nesta etapa foi da marca Leitz, modelo Ortholux 2 Pol-BK através a análise de lâminas delgadas preparadas com alguns agregados coletados no interior dos concretos.

Já as análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas em um equipamento da LEICA, modelo S440i, em amostras provenientes dos testemunhos de concreto com superfícies de fratura, após a sua fragmentação, com o objetivo de avaliar sua porção interna. Durante as análises no MEV foi utilizado o detector de elétrons secundários (SE) para formação das imagens em conjunto a técnica de espectrometria por energia dispersiva de raios-X (EDX) para as microanálises pontuais dos elementos químicos presentes. Todas as amostras analisadas no MEV sofreram uma preparação prévia através da deposição de fina camada de material condutor (Au-ouro) sobre as suas superfícies (em média 25nm).

C. Ensaio de Expansão

Nos ensaios de expansão, denominados de expansão residual, as três classes de concreto (C0, C1 e C2) foram investigadas. Para permitir a leitura de comprimento das amostras ao longo do tempo e determinar conseqüentemente as expansões, foi necessária a fixação de pinos de aço inox na superfície dos testemunhos. Em seguida, as amostras foram submetidas às condições prescritas na norma americana ASTM C-1293 para concreto moldado em laboratório, fazendo-se uma adaptação para os testemunhos extraídos.

Os testemunhos foram testados em duas condições de exposição, sendo uma em ambiente de elevada umidade (~90%) e a outra a partir de sua imersão em água, ambos em temperatura igual a $38^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Foram ensaiados 4 testemunhos por condição de exposição e classe de concreto, na sua maioria, totalizando 23 testemunhos em ensaio. Os testemunhos foram mantidos nos ambientes por 365 dias, sendo realizadas periodicamente leituras de expansão.

III. RESULTADOS OBTIDOS

A. Análises Macroscópicas

As amostras pertencentes à classe C0 foram as que menos apresentaram indícios da RAA, possuindo apenas algumas

manchas escuras na argamassa e poucas bordas em torno dos agregados.

No que diz respeito à classe C1 foram observadas manchas na argamassa e vários poros contendo material branco no seu interior, sendo que alguns apresentavam manchas escuras ao seu redor. Foi visualizado também, nas bordas de alguns poros próximos aos agregados, material vítreo e algumas regiões com descoloração da argamassa (esbranquiçada).

A classe C2 foi a que mais apresentou características da reação, sendo visualizados poros com material branco no seu interior, na sua maioria faceando aos agregados, manchas escuras, material esbranquiçado na argamassa e bordas ao redor dos agregados. Alguns poros também continham com bordas escuras e material vítreo ao seu redor.

As Figuras 2 a 5 a seguir registram algumas destas características.



Figura 2. Manchas escuras ao redor dos agregados (C0).



Figura 3. Poro com neoformação de material branco no interior e vítreo na sua borda (C2).



Figura 4. Bordas escuras e torno dos agregados (C2).



Figura 5. Fissuras nos agregados (C2)

B. Análises Microscópicas

A partir das análises petrográficas e mineralógicas por microscopia ótica, verificou-se que todas as britas analisadas a partir das amostras selecionadas são de origem quartzítica e natureza metamórfica. A composição mineralógica média estimada foi:

Quartzo: 85% a 90 %; muscovita: 5 % a 10 %; minerais opacos: < 5 %.

A granulação das amostras dos agregados apresenta-se fina, com textura granoblástica e nítida foliação metamórfica, definida pela orientação preferencial dos cristais alongados (laminares) de muscovita e dos cristais estirados de quartzo tensionados e com contatos suturados. Os cristais de quartzo apresentam extinção ondulante freqüente, porém não foi possível a sua medição por não se ter cristais com faces bem definidas. A muscovita ocorre sob a forma de pequenas palhetas orientadas entre os cristais de quartzo. A Figura 6 registra as principais características observadas.



Figura 6. Fotomicrografia do quartzito - quartzos estirados, suturados e com extinção ondulante e finas palhetas de muscovita (coloridas) orientadas.

As principais características por MEV observadas estão descritas a seguir. A classe C0 apresentou poucos indícios da reação, apenas na região das manchas escuras se notou uma fase maciça sugestiva do gel da RAA e alguns produtos cristalizados sobre o agregado, ambos de composição sílico-cálcico alcalina. Nas amostras da classe C1 (menos alterada visualmente) foram observados produtos cristalizados, sílico-cálcico potássicos nos poros brancos e gel maciço

gretado na região das manchas escuras na argamassa. Foram também verificados alguns produtos aciculares na interface com os agregados.

Em relação às amostras pertencentes à classe C2 (mais alterada visualmente) foram verificadas acículas na região de interface pasta/agregado (representando as bordas), sobre o agregado e também nos poros, argamassa contendo gel maciço gretado (na região das manchas escuras) e argamassa com deposição de produtos aciculares na região esbranquiçada, todos composição sílico-cálcico alcalina.

As Figuras 7 a 11 apresentadas a seguir registram as principais características típicas da RAA observadas.

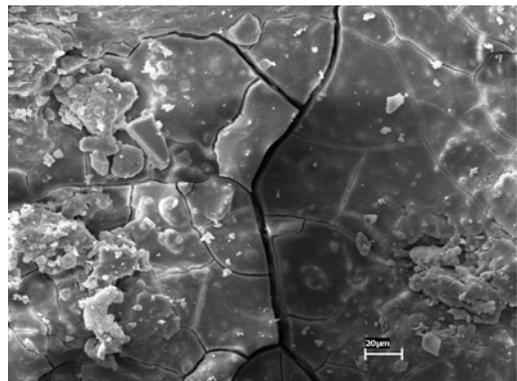


Figura 7. Micrografia apresentando gel gretado botrioidal (C0).

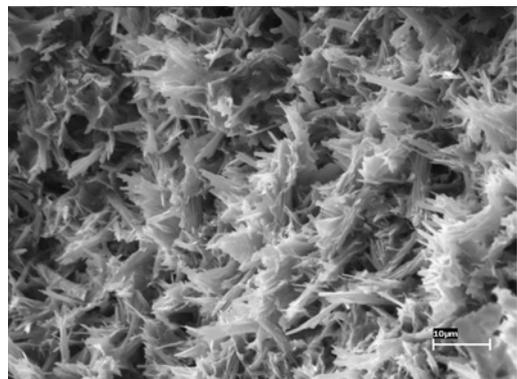


Figura 8. Micrografia apresentando produtos cristalizados da RAA poro (C1).

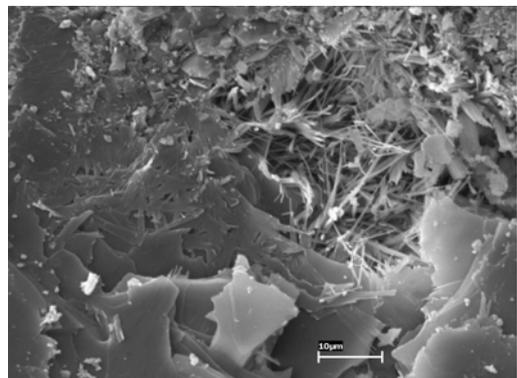


Figura 9. Micrografia apresentando formação de acículas na região de interface com o agregado (C2).

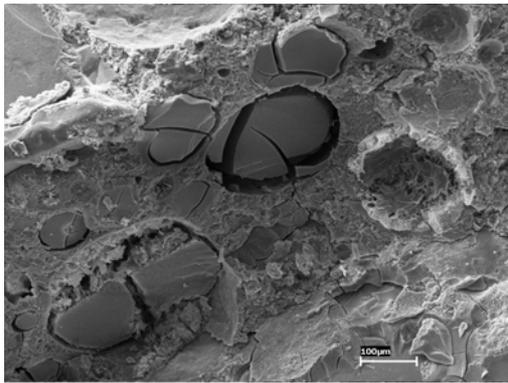


Figura 10. Micrografia mostrando vários poros preenchidos por gel (C2).

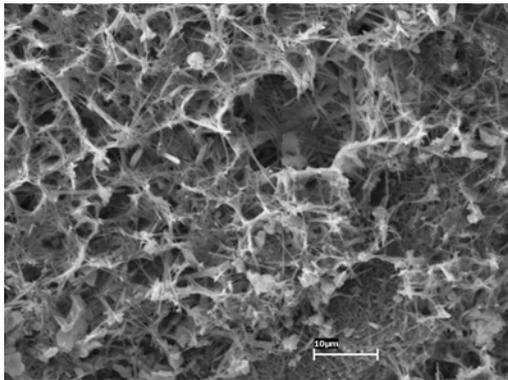


Figura 11. Micrografia indicando a presença de cristais rendados na argamassa (C2).

Com base nas análises realizadas por microscopia eletrônica de varredura, constata-se a presença da reação álcali-agregado em praticamente todas as amostras de testemunho de concreto selecionadas nesta etapa, independente da classe estudada. Porém, apesar de a microscopia eletrônica de varredura não representar uma análise quantitativa, nota-se uma incidência bastante baixa destes produtos nos testemunhos pertencentes à classe C0 (concretos extraídos à jusante) quando comparado com as classes C1 e C2 (montante). A classe C2 foi a que apresentou maior incidência e variedade de produtos característicos da RAA. Os produtos observados possuem, na sua maioria, os elementos químicos silício, cálcio e potássio, e formas variadas mostrando-se coerentes com os géis formados na reação. [1]

C. Ensaios de Expansão

Os resultados das expansões residuais determinadas, ao longo do tempo, nas várias amostras obtidas a partir os testemunhos de concreto extraídos, quando submetidas à condição de elevada umidade e temperatura de 38°C, e de acordo com cada Classe (C0, C1 e C2), encontram-se apresentados nas Figuras 12 a 14 a seguir com suas respectivas médias. Nas legendas encontram-se identificados os números dos testemunhos extraídos e a respectiva média calculada. A Classe C0 apresenta um testemunho com expansão finalizada aos 180 dias em virtude de ter sido selecionado para outros ensaios do programa experimental.

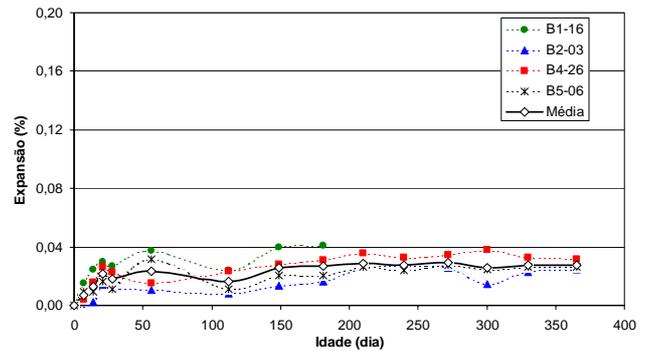


Figura 12. Expansão residual – Ambiente de elevada umidade - Classe C0.

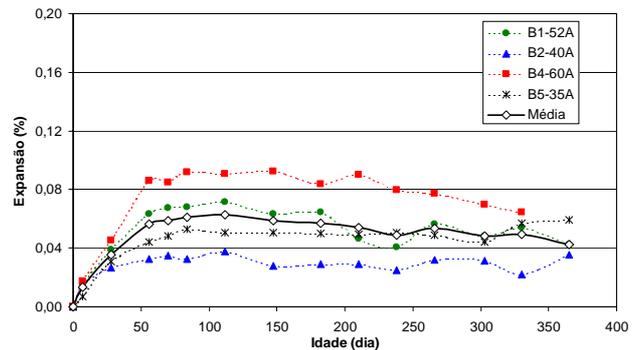


Figura 13. Expansão residual – Ambiente de elevada umidade - Classe C1.

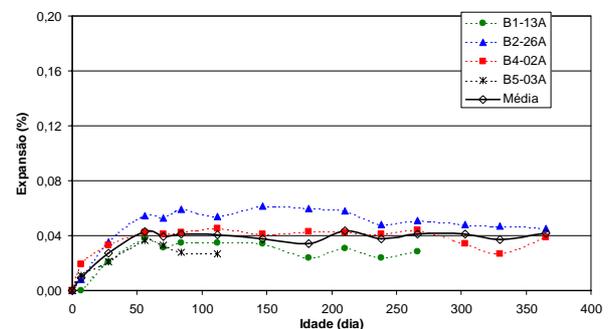


Figura 14. Expansão residual – Ambiente de elevada umidade - Classe C2.

Verifica-se para a condição de elevada umidade à 38°C e para todas as classes analisadas que até a idade de aproximadamente 56 dias as expansões crescem gradativamente, não se notando crescimento a partir desta idade. As maiores expansões observadas aos 365 dias foram de 0,06% para a amostra pertencente à Classe C1. Em média, e aos 365 dias, as expansões giram em torno de 0,04% para as classes 1 e 2 e 0,03% para a classe C0.

Com o objetivo de verificar estatisticamente a influência da classe de concreto (C0, C1 e C2) nas expansões determinadas, foi realizada uma análise de variâncias independente nas idades de 180 e 365 dias conforme apresentado na Tabela I.

Tabela I

Análise de variância para as expansões em ambiente úmido.

Idade (dia)	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
180	Classe	0,0019	2	0,0010	2,59	4,26	NS
	Erro	0,0033	9	0,0004			
	Total	0,0052	11	---			
365	Classe	0,0005	2	0,0003	3,96	5,79	NS
	Erro	0,0003	5	0,0001			
	Total	0,0009	7	---			

Com base nos resultados da análise de variâncias, verifica-se que não existe diferença significativa (NS) entre as três classes estudadas e nas idades analisadas para um nível de significância de 0,05. Ou seja, independente do nível de deterioração as três classes expandem de forma semelhante.

Interessante comentar também que, apesar de ainda existirem expansões, os valores médios obtidos apresentam-se dentro do limite aceitável de 0,04% apresentado por norma para concreto moldado (ASTM C-1293). Deve-se apenas fazer uma ressalva que existem alguns testemunhos que apresentaram valores individuais um pouco acima deste limite.

Os resultados das expansões residuais determinadas, ao longo do tempo, nas várias amostras obtidas a partir os testemunhos de concreto extraídos, quando submetidas à condição de imersão em água, e de acordo com cada Classe (C0, C1 e C2), encontram-se apresentados nas Figuras 15 a 17, a seguir com suas respectivas médias. Nas legendas encontram-se identificados os números dos testemunhos extraídos e a respectiva média calculada.

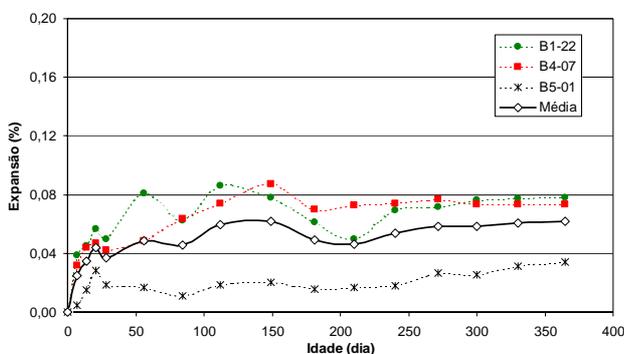


Figura 15. Expansão residual – Ambiente de imersão em água - Classe C0.

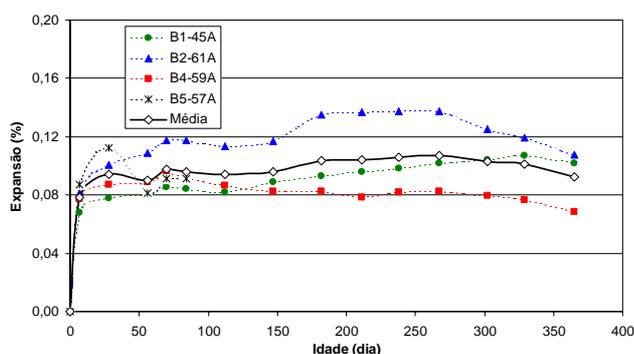


Figura 16. Expansão residual – Ambiente de imersão em água - Classe C1.

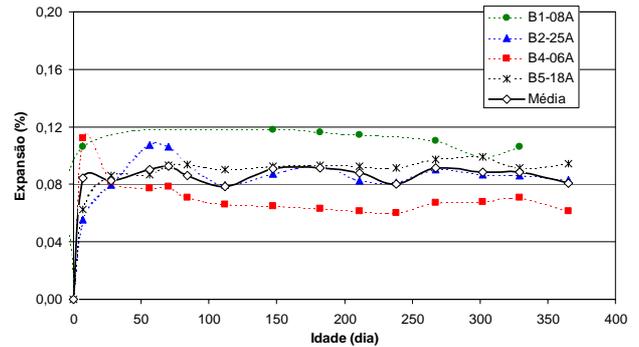


Figura 17. Expansão residual – Ambiente de imersão em água - Classe C2.

A partir das figuras apresentadas na condição de imersão em água, observa-se um ganho expressivo das expansões logo nas idades iniciais de ensaio (em geral, até 28 dias), sendo que aos 365 dias a maior expansão obtida foi igual a 0,11% para uma amostra pertencente à Classe 1, e em média global gira em torno de 0,08%.

Na Tabela II encontram-se apresentados os resultados referentes à análise de variância para verificar a influência da classe do concreto nas expansões dos testemunhos imersos em água, nas idades de 180 e 365 dias, respectivamente.

Tabela II

Análise de variância para as expansões em imersão em água.

Idade (dia)	Efeito	SQ	GL	MQ	Fcal	F0,05	Signif.
180	Classe	0,0050	2	0,0025	3,76	4,74	NS
	Erro	0,0047	7	0,0007			
	Total	0,0096	9	---			
365	Classe	0,0014	2	0,0007	1,67	5,14	NS
	Erro	0,0026	6	0,0004			
	Total	0,0041	8	---			

Com base nos resultados da análise de variâncias apresentados na Tabela II (para um nível de significância de 0,05), e de forma semelhante à condição de exposição em ambiente úmido, na condição de imersão em água não foram observadas diferenças significativas entre as três classes estudadas.

Nos ensaios de expansão residual com testemunhos de concreto provenientes de cinco estruturas de casa de força em usina hidrelétrica, em ambiente com 100% de umidade a 38°C, Hasparyk et al. [7] constataram expansões na faixa de 0,02% a 0,06% em um ano, sendo este último valor obtido em testemunhos bastante afetados pela RAA provenientes da UHE Moxotó.

Sabe-se que a água desempenha um papel muito importante nas reações químicas da RAA. De acordo com Poole [4], a água tem duas funções, uma primeira de permitir a migração e movimentação dos cátions alcalinos e íons hidroxila e na segunda, no que diz respeito à sua adsorção pelo gel, levando às expansões.

Uma possível explicação para este comportamento expansivo mais pronunciado nas primeiras idades é que quando o concreto já se apresenta deteriorado pela RAA, contendo gel (produto da reação) no seu interior e em

condição não saturada, qualquer fonte adicional de água é responsável por produzir rápidas e elevadas expansões em função da absorção do gel. As expansões que normalmente são verificadas em idades mais avançadas ocorrem em decorrência dos novos produtos expansivos formados naquele ambiente, caso haja ainda álcalis disponíveis para reagir.

Desta forma, as discussões apresentadas são válidas para os dois ambientes estudados e as diferenças nas taxas de expansão verificadas ocorrem apenas em função da maior ou menor disponibilidade de água. No caso dos testemunhos saturados (condição de imersão em água), ocorre um incremento ainda mais das taxas de expansão medidas nas idades iniciais referentes ao gel já formado.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As investigações microestruturais realizadas tanto por microscopia ótica como por microscopia eletrônica de varredura mostraram-se bastante eficientes no diagnóstico da RAA dos concretos extraídos da barragem através da identificação dos minerais reativos nos agregados e dos produtos característicos da patologia formados nos concretos.

Do ponto de vista mineralógico, e por microscopia ótica, os agregados constituintes dos testemunhos de concreto extraídos são bastante semelhantes ao quartzito coletado na região da usina, sendo o quartzo deformado e estirado o principal constituinte responsável pela alta reatividade dos agregados empregados nos concretos, além da presença de uma fina granulometria dos cristais de quartzo.

Os testemunhos de concreto analisados por microscopia eletrônica de varredura encontram-se com a reação já instalada uma vez que foi possível identificar os produtos neoformados através das várias fases presentes. A única diferença mais expressiva observada pelo MEV foi a menor incidência destas fases nas amostras pertencentes à classe C0 que representa, por investigações visuais superficiais, o concreto sem indícios da reação quando inspecionados na galeria de drenagem do vertedor. A classe 2, considerada a mais alterada, foi a que apresentou maior incidência de produtos e morfologias variadas, mostrando resultados bastante compatíveis.

Os ensaios de expansão nos testemunhos de concreto extraídos indicam que os agregados presentes ainda possuem minerais potencialmente reativos para reagir e manter a reação ainda por algum tempo, mostrando a existência de expansões residuais.

Nos ensaios de expansão, nas condições de elevada umidade e imersão em água, ambos a 38°C, apesar do nível de expansão ser diferenciado, representando em média para todas as classes de concreto analisadas 0,04% e 0,08%, respectivamente, a tendência é que ocorra estabilização das expansões no tempo avaliado (um ano). Interessante comentar que a condição de elevada umidade à 38°C seria umas das mais próximas da realidade na galeria de drenagem. A variação nos níveis de expansão apresentados

ocorre em virtude da água disponível, da alcalinidade da solução exposta e da presença de gel pré-existente, sendo que a temperatura acelera ainda mais as reações químicas envolvidas.

O resultados e métodos de expansão residual empregados no presente estudo mostraram-se satisfatórios para delinear o comportamento de um concreto afetado pela RAA. As metodologias empregadas, embora apresentem algumas limitações e carências de normas específicas para testemunhos de concreto extraídos, podem ser utilizadas na investigação de outras estruturas com o mesmo tipo de patologia, desde que sejam tomados cuidados com a condição estudada.

Conforme verificado nesta pesquisa, a reação álcali-agregado pode desencadear diferentes níveis de deterioração dependendo da condição em que o concreto se encontra (elevada umidade ou imersão em água), portanto não existe regra geral para definir um comportamento, sendo necessários estudos específicos para cada caso ou estrutura, sendo compatíveis com o ambiente no qual ela se encontra.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do financeiro de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A e do Programa de P & D da ANEEL por ter permitido o desenvolvimento da presente pesquisa.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HASPARYK, N. P. (1999). "Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa". Goiânia, 1999. 257p. *Dissertação de Mestrado* - UFG, Escola de Engenharia Civil.
- [2] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. *Concreto - estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Ed. Pini, 1994.
- [3] HASPARYK, N. P. "Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado". Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005
- [4] STANTON, T. E. (1940). "Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate". *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, Dec. 1940, p. 1781-1811.
- [5] POOLE, A. B. "Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete". In: SWAMY, R. N. *The alkali-silica reaction in concrete*. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.1-29.
- [6] TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.
- [7] BICZOK, I. *Corrosion y proteccion del hormigón*. Trad. de Emilio J. d'Ocon Asensi. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972. p. 275-280.
- [8] HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F. A. "Expansions due to AAR verified in concrete cores and mortars from several power plants in Brazil" *In International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete*, 12., 2004, Beijing/China. *Proceedings...* Beijing/China: International Academic Publishers, Edited by Tang Mingshu & Deng Min, 2004, v. II, p.888-897.

- [9] HOBBS, D. W. *Alkali-silica reaction in concrete*. London: Thomas Telford, 1988. 183p.
- [10] BULLETIN 79 (1991). "Alkali-aggregate reaction in concrete dams - review and recommendations". Paris: CIGB/ICOLD, 1991.