

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS ILHA SOLTEIRA

PALOMA GAZOLLA DE OLIVEIRA ALBERTINI

**Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas
para controle da Reação Álcali-Agregado**

Ilha Solteira

2014

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PALOMA GAZOLLA DE OLIVEIRA ALBERTINI

**Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas
para controle da Reação Álcali-Agregado**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Câmpus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON DA SILVA SEGANTINI

Orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A334s Albertini, Paloma Gazolla de Oliveria.
Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da reação álcali-agregado / Paloma Gazolla de Oliveria Albertini. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
124 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2014

Orientador: Antonio Anderson da Silva Segantini
Inclui bibliografia

1. Reação álcali-agregado. 2. Impermeabilizantes. 3. Sensores de umidade e temperatura.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA



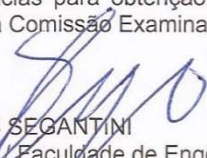
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

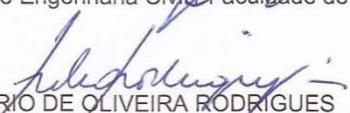
TÍTULO: Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da Reação Álcali-Agregado

AUTORA: PALOMA GAZOLLA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL , Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ROGÉRIO DE OLIVEIRA RODRIGUES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. SELMO CHAPIRA KUPERMAN
Departamento de Engenharia de Construção Civil / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Data da realização: 16 de junho de 2014.

Ao meu saudoso pai (*in memoriam*) e aos
que aqui ficaram, ao meu lado

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, que me tem permitindo alcançar tudo quanto tem desejado meu coração.

Aos meus familiares. À minha “nhirmã” Pâmella e ao meu marido pelo cuidado e paciência que eles dispensam a mim: ela durante a vida toda e ele nestes últimos dois anos. Aos meus pais por me ensinarem a importância da educação. À Sandra por me receber em sua família com tanto carinho. Aos demais familiares que me consolaram nos tempos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Anderson (como todos chamam, pelo segundo nome) pela paciência, por toda a orientação e por sempre manter a calma mesmo em cima dos prazos.

Agradeço ao Eng. Flávio Salles pelas constantes ideias, orientações e apoio: desde o convite para fazer parte deste Projeto até os momentos finais na elaboração deste texto. E também ao Aloísio Celeri, que gerenciou este Projeto na etapa final.

Ao Dr. Selmo Kuperman pelas reuniões e discussões sobre os experimentos e à sua equipe (Grazielle e Eduardo) pela colaboração na disposição dos materiais necessários no programa experimental.

Agradeço ao Eng. Flávio Sato por fazer muito mais do que cabia a ele dentro do combinado. Ao Prof. Alexandre Silva pelo auxílio nas pesquisas dos sensores e colaboração nos trabalhos.

Aos funcionários do Laboratório CESP de Engenharia Civil que foram sempre muito solícitos e atenciosos, desde a execução dos experimentos até nas simples conversas nos corredores. Só faltaram mais confraternizações e saibam que vocês fizeram muita falta quando foram embora.

Aos professores do programa de pós graduação seja pelo conhecimento transmitido ou pelas longas conversas, como é o caso do Prof. Lollo. E aos professores da graduação em Engenharia Civil da Unicastelo pois também estiveram presentes na minha formação que se deu paralela a este mestrado.

A todos os amigos que fiz em Ilha Solteira e em especial a Juju, a Vanessinha, a Susi e o “Rochinha”.

Muito obrigada!

Resumo

A reação álcali-agregado é um fenômeno expansivo que afeta a durabilidade e a segurança de estruturas de concreto e sabe-se que a mesma está intimamente ligada à presença de umidade. Apesar da grande quantidade de pesquisas voltadas ao tema, ainda não foram esclarecidas maneiras de como interromper a reação e impedir os progressos das expansões.

Porém, pesquisas recentes indicam o uso de produtos impermeabilizantes como ferramenta na diminuição da umidade disponível no interior do concreto e conseqüentemente, na mitigação da reação após seu início. Então, visando diminuir a umidade interna em estruturas de concreto, o projeto aqui apresentado tem como objetivo avaliar a utilização de impermeabilizantes, quantificando a eficiência desses produtos testados através de sensores de umidade e de temperatura, embutidos no concreto em fase posterior à sua execução e também avaliar a utilização destes produtos na prevenção de expansões no concreto devido à RAA.

Além da parte experimental, este trabalho traz um levantamento do estado da arte da Usina Hidrelétrica Jaguari mostrando resultados de trabalhos desenvolvidos anteriormente e com a apresentação de dados atualizados, divulgando uma recente taxa de expansão da estrutura da Tomada d'Água da Usina.

Palavras chave: Reação álcali-agregado. Impermeabilizantes. Sensores de umidade e temperatura.

Abstract

The alkali-aggregate reaction is an expanding problem that affects the durability and safety of concrete structures and it is linked to the presence of moisture in concrete but are not yet clear ways of how to stop the reaction and prevent the progress of the expansions.

Recent research indicates the use of waterproofing products as a tool in the reduction of available moisture within the concrete and thereby mitigate the reaction after its inception. So in order to reduce indoor moisture in concrete structures, this project aims to evaluate the use of waterproofing products, quantifying the efficiency of the products tested by sensors embedded in concrete and also in preventing expansions in the concrete due to AAR.

Besides the experimental part, this work provides a survey of the State of the Art of Jaguari Hydroelectric Power Plant showing results of previous work and the presentation of updated data developed, disseminating a recent rate of expansion of the structure of Jaguari water intake structure.

Key words: Alkali-aggregate reaction. Waterproofing. Humidity sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estruturas de concreto afetadas pela RAA na década de 40.....	18
Figura 2- Presença da RAA em fundações de edifícios em Recife / PE.....	22
Figura 3- Pavimento de concreto e estrutura de ponte afetados pela RAA.....	23
Figura 4- Estudos relativos à RAA no Brasil ao longo dos anos.	23
Figura 5- Estrutura da tomada d'água durante a construção da usina.	25
Figura 6- Usina Hidrelétrica Jaguari.	25
Figura 7- Fatores necessários para ocorrência da RAA.	27
Figura 8- Expansão causada pela RAA de acordo com a umidade relativa.	28
Figura 9- (a) Hábito cristalino da sílica (tridimensional) e em plano: (b) sílica cristalina e (c) sílica amorfa.....	31
Figura 10- Agregado reativo e álcalis em solução.	32
Figura 11- Superfície do agregado sendo atacada pelos íons de hidroxila e formação do grupo Silanol.	33
Figura 12- Ataque da hidroxila ao grupo Silanol formando o ânion SiO^- e liberando água.	33
Figura 13- Formação do gel a partir da combinação do SiO^- e os álcalis presentes na solução.	34
Figura 14- Expansão do gel sílico-alcálico.	34
Figura 15- Tensões geradas pela expansão do gel.....	35
Figura 16- Fissuras típicas da RAA.....	35
Figura 17- Resumo do processo da reação álcali-agregado.	36
Figura 18- Fluxograma geral para uso do agregado em concreto.	39
Figura 19- Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado.....	41
Figura 20- Leitura do comprimento da barra.....	42
Figura 21- Barras de argamassa mantidas em solução de NaOH a 80°C.....	42
Figura 22- Armazenamento dos prismas de concreto em baldes.	44
Figura 23- Aplicação do CFRP.	46
Figura 24- Aplicação do tratamento eletroquímico com nitrato de lítio utilizando malha de titânio.	46
Figura 25- Painel de instrumentação para monitoramento da estrutura.	47
Figura 26- Ponte Elgeseter, na Noruega.....	48
Figura 27- Corpos de prova simulando lajes.....	49

Figura 28- Corpos de prova simulando pilares.....	50
Figura 29- Corpos de prova simulando pavimentos de concreto em pontes.....	50
Figura 30- Corpos de prova expostos às condições externas.....	51
Figura 31- Fissuras tipo mapa na laje da TA preenchidas com material branco.....	54
Figura 32- Fissura na laje da TA com 10 mm de abertura e sua situação em 1990.....	54
Figura 33- Fissuras no muro-guia e o deslocamento diferencial da guia metálica.....	54
Figura 34- Bordas de reação.....	56
Figura 35- Poros preenchidos por material branco.....	56
Figura 36- Fissuras entre pasta e agregado.....	56
Figura 37- A Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.....	57
Figura 38- Leituras do MT sobre a fissura.....	60
Figura 39- Aparelho de leitura, gabarito para fixação e conjunto de BT instalado na fissura.....	61
Figura 40- BT e MT instalados na laje e no pilar do pórtico de carga da TA.....	61
Figura 41- Deslocamentos do MT1.....	63
Figura 42- Deslocamentos do MT3.....	63
Figura 43- Deslocamentos do MT4.....	64
Figura 44- Deslocamentos do MT5.....	64
Figura 45- Deslocamentos do MT6.....	65
Figura 46- Deslocamentos do MT7.....	65
Figura 47- Deslocamentos do MT8.....	66
Figura 48- Deslocamentos do MT9.....	66
Figura 49- Deslocamentos do MT10.....	67
Figura 50- Deslocamentos do MT11.....	67
Figura 51- Deslocamentos do MT12.....	68
Figura 52- Deslocamentos do MT14.....	68
Figura 53- Deslocamentos do MT15.....	69
Figura 54- Deslocamentos do MT16.....	69
Figura 55- Deslocamentos do MT17.....	70
Figura 56- Deslocamentos do MT18.....	70
Figura 57- Deslocamentos do MT19.....	71
Figura 58- Perfil de instalação das hastes dos extensômetros nº1 e nº 2, respectivamente.....	72
Figura 59- Local de instalação dos extensômetros de hastes múltiplas.....	72
Figura 60- Deslocamentos das hastes do extensômetro nº 1.....	73
Figura 61- Fases do desenvolvimento da RAA.....	74

Figura 62- Deslocamentos das hastes do extensômetro nº 2.	75
Figura 63- Marco superficial e baliza localizada na laje da TA.	76
Figura 64- Marco de referência indeslocável sobre a rocha.	76
Figura 65- Localização dos muros guia na TA.	77
Figura 66- Cantoneira guia para apoio da extremidade livre e a viga metálica posicionada. ...	77
Figura 67- Instalação do aparato com LVDT.	78
Figura 68- Sensor instalado junto à armadura antes da concretagem.	81
Figura 69- Sensores utilizados no projeto.	83
Figura 70- Sensor SHT 11 e sistema de aquisição.	83
Figura 71- Sensor do DHT 22 e respectivo sistema de aquisição.	84
Figura 72- Interface do software de leitura dos dados do sensor do DHT 22.	85
Figura 73- Sensor e dispositivo de leitura do IButton 1923.	86
Figura 74- Gráfico da leitura de dados do sensor do IButton 1923.	87
Figura 75- Corpo de prova com dois sensores inseridos.	89
Figura 76- Inserção e selamento do sensor no orifício.	90
Figura 77- Corpo de prova moldado com orifícios.	91
Figura 78- Corpos de prova dentro da estufa.	92
Figura 79- Impermeabilização dos corpos de prova.	93
Figura 80- Vedação dos orifícios.	95
Figura 81- Corpos de prova na câmara úmida.	96
Figura 82- Procedimento para leitura de umidade e temperatura no interior do concreto.	97
Figura 83- Execução do orifício no prisma de sacrifício.	99
Figura 84- Prismas na câmara térmica com água e sem água.	101
Figura 85- Prisma no relógio comparador.	101
Figura 86- Comparação entre os sensores.	107
Figura 87- Resultado obtido pelo sensor do DHT 22.	107
Figura 88- Corpos de prova das décadas de 1960 a 1970, no LCEC.	108
Figura 89- Verificação da umidade interna no concreto.	109
Figura 90- Pilar do LCEC onde foi medida a umidade interna no concreto.	109
Figura 91- Expansões no ensaio dos prismas.	111
Figura 92- Prismas das condições 5 e 1, respectivamente.	113
Figura 93- Lixiviação do prisma da condição 5.	113
Figura 94- Prismas das condição 2, 3 e 4, respectivamente.	114
Figura 95- Lixiviação do prisma na condição 4.	115

Figura 96- Prisma da condição 3.....	115
--------------------------------------	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Obras afetadas pela RAA.	19
Tabela 2- Normas internacionais sobre o tema.	30
Tabela 3- Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de uso.	40
Tabela 4- Granulometria requerida para o agregado utilizado no ensaio de expansão.	41
Tabela 5- Granulometria requerida para o agregado graúdo utilizado no ensaio de expansão.	43
Tabela 6- Localização dos medidores tri-ortogonais.....	62
Tabela 7- Características dos sensores	82
Tabela 8- Comparação das características dos sensores.....	87
Tabela 9- Concreto utilizado no ensaio preliminar.	88
Tabela 10- Traço do concreto utilizado (ensaio definitivo).	90
Tabela 11- Características dos produtos impermeabilizantes e CPs aplicados.	94
Tabela 12- Condições dos prismas no ensaio de expansão.	100
Tabela 13- Médias de Temperatura e Umidade para cada produto ao longo dos ciclos.	103
Tabela 14- Diferenças de umidade entre os ciclos.	104
Tabela 15- Comparação dos valores obtidos pelos sensores.....	106
Tabela 16- Condições nos prismas no ensaio de expansão.	110
Tabela 17- Expansões verificadas nos prismas*.	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	Alkali Aggregate Reaction.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASR	Alkali-Silica Reaction.
BT	Base para medição dos movimentos de fissuras.
CESP	Companhia Energética de São Paulo.
CP	Corpo de prova.
EH	Extensômetro Múltiplo de Hastes.
GPS	Global Positioning System.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
LCEC	Laboratório CESP de Engenharia Civil.
LVDT	Linear Variable Differential Transformer.
MT	Medidor Triortogonal.
MEV	Microscópio eletrônico de varredura.
RAA	Reação álcali-agregado.
RAS	Reação Álcali-Sílica.
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A.
TA	Tomada d'Água.
T °C	temperatura em graus Celsius
UHE	Usina Hidrelétrica.
UR %	Umidade relativa do ar em porcentagem

Sumário

1.1 Justificativa do trabalho	15
1.2 Objetivos da Pesquisa.....	16
1.3 Organização da Pesquisa	16
2 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO.....	18
2.1 Histórico	18
2.2 Fatores interdependentes	26
2.3 Tipos de RAA, definições e normas técnicas	29
2.4 Mitigação da RAA: Sistemas e Soluções.....	44
3 ESTUDO DE CASO: TOMADA D'ÁGUA DA UHE JAGUARI.....	53
3.1 Diagnóstico positivo para RAA no concreto	53
3.2 Monitoramento da estrutura da TA	58
3.3 Análise e considerações	79
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO	80
4.1 Abrangência e etapas	80
4.2 Medidas por sensores embutidos no concreto.....	81
4.3 Determinação dos protótipos de concreto para os ensaios	88
4.4 Sistemas para impermeabilização do concreto: eficiência e compostos	90
4.5 Impermeabilização do concreto com RAA.....	98
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	102
5.1 Eficiência dos impermeabilizantes e a umidade interna do concreto.....	102
5.2 Comparação de resultados e validação do sensor aplicado	105
5.3 Umidade relativa no interior do concreto com mais de 40 anos de idade	108
5.4 Eficiência do impermeabilizante e a evolução da expansão do concreto por RAA..	110
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
REFERÊNCIAS	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa do trabalho

Estruturas de concreto e sujeitas à presença de umidade são suscetíveis às reações deletérias que podem afetar sua durabilidade. Dentre essas, está a reação álcali-agregado (RAA) como uma das manifestações mais instigantes e estudadas atualmente no âmbito mundial.

No Brasil, o estudo desta reação adquiriu grande impulso a partir da construção da Usina Hidrelétrica (UHE) Jupiá, executada pela Companhia Energética de São Paulo - CESP na década de 60 (ZOILO, 2010). Durante a construção foi observada a presença de fissuras no piso da obra, que foi constatado ser devido ao cascalho do Rio Paraná utilizado no concreto e que continha calcedônia como fase reativa (MUNHOZ, 2007).

Para solucionar o problema, foi instalada uma fábrica local a fim de produzir pozolana a partir da argila calcinada, para ser adicionada ao cimento Portland e assim, mitigar a reação. Desta forma, a CESP tornou-se a primeira empresa brasileira a tomar providências para evitar a ocorrência da reação ainda durante a fase construtiva (KUPERMAN et. al. 2005).

A UHE Jaguari foi construída na mesma época e inaugurada em 1972 (COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO- CESP, 2012), mas sem adotar medidas de prevenção para a RAA, pois os métodos de ensaio disponíveis até então não indicaram a reatividade dos materiais utilizados (MARQUES, 2009). Porém, já na década de 80 foram observadas as primeiras manifestações patológicas nas estruturas de concreto e, somente, quase duas décadas depois foram associadas à ocorrência da RAA (ZOILO, 2010).

Desde então a CESP tem investido no conhecimento das reações que afetam o concreto da UHE Jaguari através de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), desenvolvidos no Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC) juntamente com a Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de Ilha Solteira, e a empresa de consultoria Deseq, com recursos financeiros da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

No primeiro P&D, realizado entre 2007 e 2010, foi possível constatar o tipo de reação presente na tomada d'água (TA) na UHE Jaguari, adaptar um teste colorimétrico para a identificação da RAA, e instalar uma série de equipamentos para monitoramento das expansões causadas pela reação (MARQUES, 2009, MIZUMOTO, 2009 e ZOILO, 2010). No segundo P&D, ao qual se refere este trabalho, que vem sendo desenvolvido desde 2012,

busca-se, além de melhorar o sistema de monitoramento, testar sistemas de impermeabilização que possam ser aplicados como medidas de mitigação da RAA na UHE Jaguari.

1.2 Objetivos da Pesquisa

Tendo em vista que a RAA está intimamente ligada à presença de umidade no concreto, neste projeto foram utilizados sensores de umidade e temperatura com o intuito de avaliar sua utilização na aferição da umidade relativa do ar em cavidades situadas em corpos de prova de concreto.

Com o uso destes sensores pretendeu-se avaliar a eficiência de produtos impermeabilizantes dentro do conceito de impedir a entrada de água no concreto, mas permitir a saída da mesma do interior do concreto em forma de vapor. Ainda no intuito de avaliar o desempenho impermeabilizante conduziu-se um ensaio para avaliar o produto na mitigação das expansões causadas pela RAA.

Em fase posterior pretende-se aplicar o produto impermeabilizante de melhor desempenho nos pilares presentes na estrutura da TA da UHE Jaguari, visto que os mesmos apresentam expansões cuja origem já provou-se ser devido à RAA.

Além da parte experimental, este trabalho traz um breve levantamento do estado da arte da UHE Jaguari, concentrando tanto os resultados dos trabalhos desenvolvidos no P&D anterior, como disponibilizando dados atualizados com um novo cálculo da taxa de expansão da estrutura da TA.

1.3 Organização da Pesquisa

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro, tem-se a apresentação da justificativa e os objetivos pretendidos com o trabalho, bem como a presente explanação sobre a organização da pesquisa.

No segundo capítulo tem-se a revisão bibliográfica sobre a RAA citando um breve histórico e os fatores envolvidos na ocorrência da reação. Ainda no capítulo 2 (dois), são contemplados os tipos da reação conhecidos e as normas nacionais que vigoram sobre o tema e, também, uma apresentação de pesquisas recentes que tratam das tentativas de mitigação em âmbito mundial.

No terceiro capítulo tem-se o levantamento sobre o estado da arte da UHE Jaguari, dividindo o assunto em duas partes: a comprovação da existência da RAA e o sistema de monitoramento já implantado na TA da Usina, divulgando os dados procedentes do monitoramento da abertura de fissuras.

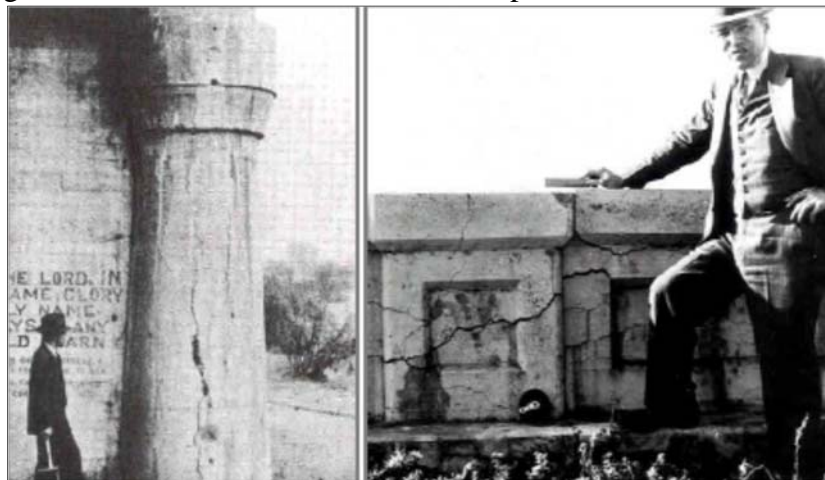
No quarto capítulo é descrito o programa experimental bem como todos os procedimentos realizados previamente aos ensaios, visando definir as características necessárias para os experimentos. No quinto capítulo são apresentados resultados da parte experimental deste projeto. No sexto capítulo são feitas as considerações finais.

2 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

2.1 Histórico

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação expansiva deletéria que afeta estruturas de concreto. Essa reação foi descrita pela primeira vez no final da década de 30, na Califórnia, por Stanton (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Na ocasião, o engenheiro observou barras de argamassa que apresentavam manchas brancas, cobertas de eflorescências e fissuras, similares ao que se encontrava nas estruturas afetadas da Califórnia (ZOILO, 2010).

Figura 1- Estruturas de concreto afetadas pela RAA na década de 40.



Fonte: Thomas (2008).

A partir de então, os relatos sobre a incidência deste tipo de reação tornaram-se mundiais. Em 1998, já eram relatadas 142 estruturas afetadas em diversos países (KIHARA et. al. 1998) e no levantamento apresentado por Marques (2009) são citadas pelo menos 20 estruturas afetadas no Brasil. A Tabela 1 agrupa várias obras afetadas pelas RAA em território nacional.

Segundo Bernardes (2000) a primeira ocorrência deste tipo de reação no Brasil se deu em 1946 afetando a usina hidrelétrica de Peti. Posteriormente houve relatos do problema na UHE Apolônio Sales (Moxotó), localizada na Bahia, onde evidências da reação já se manifestavam ainda durante seu período construtivo (em 1972).

Tabela 1- Obras afetadas pela RAA.

Obra	UF	Propriedade	Início Construção	Término da Construção/Início de operação	Indícios e/ou evidências da RAA	Tipo de agregado
UHE Jurupará	SP	CBA	não consta	1947	Divulgação com diagnóstico: 1997	Gnaiss, biotita granito
Barragem de Peti	MG	CEMIG	1942	1945	1964	Granito-gnaiss
Barragem Guanhões - UHE Salto Grande	MG		não consta	1953	2001	Gnaiss
UHE Jaguará	SP		1966	1971	1996	Quartzito
UHE Jaguari	SP		CESP	1963	1977	Indícios: 1985/1990 Diagnóstico: 2000
UHE Apolônio Sales (Moxotó)	AL	CHESF	1971	1977	Indícios: 1980 Diagnóstico: 1984	Granito e biotita gnaiss
UHE Paulo Afonso I	BA		1949	1955	1978	Granito, biotita gnaiss e biotita granito
UHE Paulo Afonso II	BA		1955	1967	1978	Granito e anfibólito gnaiss
UHE Paulo Afonso III	BA		1967	1973	1978	Granito e biotita granito
UHE Paulo Afonso IV	BA		1972	1979	1985	Granito, biotita gnaiss, biotita granito, anfibólito e anfibólito biotita gnaiss
UHE Pedra	BA		1964	Barragem: 1968 Casa de Força: 1978	1980	Granada granulito
UHE Sobradinho	BA		1973	1981	2000	Quartzito
Barragem de Tapacurá	PE		COMPESA	1969	1975	1990

Obra	UF	Propriedade	Início Construção	Término da Construção/Início de operação	Indícios e/ou evidências da RAA	Tipo de agregado
UTE Piratininga	SP	EMAE	não consta	1962	2002	Gnaiss
Barragem Pirapora	SP		não consta	1956	1998	Gnaiss
Barragem Reguladora Billings-Pedras	SP		não consta	1937	1992	Granito
Barragem Rio das Pedras	SP		não consta	1926	1992	Gnaiss/milonito
Usina de Rasgão	SP		não consta	1925	não consta	Granito/filito
Usina Elevatória de Pedreira	SP		Década de 1930	1937	2000	Gnaiss/milonito
Usina Elevatória de Traição	SP		Década de 1930	1940	1994	Milonito
Barragem de Joanes II	BA	EMBASA	1969	1971	1988	Gnaiss, migmatito e granulito
UHE Mascarenhas	ES	ENERGEST	1968	1974	Divulgação com diagnóstico: 2003	não consta
UHE Furnas	MG	FURNAS	1958	Barragem: 1963 Etapa 1: 1965 Etapa 2: 1974	1976	Quartzito
UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho (antiga Usina de Estreito)	SP		1965	Etapa 1: 1969 Etapa 2: 1972	1994	Quartzito
UHE Mascarenhas de Moraes (antiga Usina de Peixoto)	MG		1953	Etapa 1: 1957 Etapa 2: 1969	1994	Quartzito
UHE Porto Colômbia	MG		1970	1973	1985	Basalto/seixo de quartzo
UHE Ilha dos Pombos	RJ	LIGHT	1920	1924	1991	Gnaiss
UHE Santa Branca	SP		1950	1960	1995	Gnaiss
UHE Sá Carvalho	MG	SÁ CARVALHO S.A.	Década de 1940	1951	Divulgação com diagnóstico: 1997	Granito

Obra	UF	Propriedade	Início Construção	Término da Construção/Início de operação	Indícios e/ou evidências da RAA	Tipo de agregado
Barragem Atibainha	SP	SABESP	1969	1973	1992	Biotita gnaiss cataclástico
Barragem Cascata	SP		1973	1976	1992	Granito-gnaiss
Barragem Jaguari	SP		1977	1982	1992	Gnaiss milonitizado
Barragem Paiva Castro	SP		1968	1972	1992	Biotita granito-gnaiss
Barragem Pedro Beitch	SP		1929	1932	1992	Biotita gnaiss
Barragem Ribeirão do Campo	SP		1950	1962	1992	Biotita gnaiss cataclástico
Túnel 2	SP		1969	1973	1992	Granito
Túnel 6	SP		1969	1974	1989	Granito-gnaiss, biotita gnaiss, biotita gnaiss cataclástico
Túnel 7	SP		1978	1981	1992	Granito-gnaiss cataclástico
Edificações variadas, em fundações	PE	Diversas	variado	variado	2005	Milonito
Ponte Governador Paulo Guerra - blocos de fundação	PE	Prefeitura da Cidade de Recife	1977	1978	2002	Milonito cataclasito
Ponte sobre o Rio Tocantins - fundações	TO	DERTINS	1976	1979	Evidências: década de 1980 Divulgação: 2003	Quartzito e arenito
Ponte sobre o Rio Turvo	MG	DER/MG	Final da década de 1950	início da década de 1960	1996	Quartzito micáceo e quartzoxisto cataclástico

Fonte: Isaia, 2011.

As estruturas de concreto afetadas incluem barragens de usinas hidrelétricas e também ocorrências relatadas em barragens dos sistemas de captação da água da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). A reação também já foi constatada até mesmo em fundações de edifícios, como ocorre na região metropolitana de Recife (PECCHIO et al., 2006), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2- Presença da RAA em fundações de edifícios em Recife / PE.



Fonte: Pecchio et al. (2006).

Em todas as estruturas citadas a presença da água é uma constante e ainda, tem-se outros casos onde a RAA se instala mesmo quando a presença da água é intermitente como em pavimentos de concreto e estruturas de pontes, ambos mostrados na Figura 3.

No Brasil, o primeiro estudo voltado ao assunto da RAA foi em 1963, quando se investigavam os agregados da construção da UHE Jupuí. Mas o grande impulso do estudo da reação foi a partir do evento “Simpósio sobre a reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto” no ano de 1997, que foi o primeiro evento nacional focado no tema, sendo

novamente realizado em 2006, no estado do Rio de Janeiro. Novamente o tema foi contemplado em 2010, no 52º Congresso Brasileiro do Concreto com o seminário “A reação álcali-agregado - causas, diagnóstico e soluções”. (ISAIA, 2011).

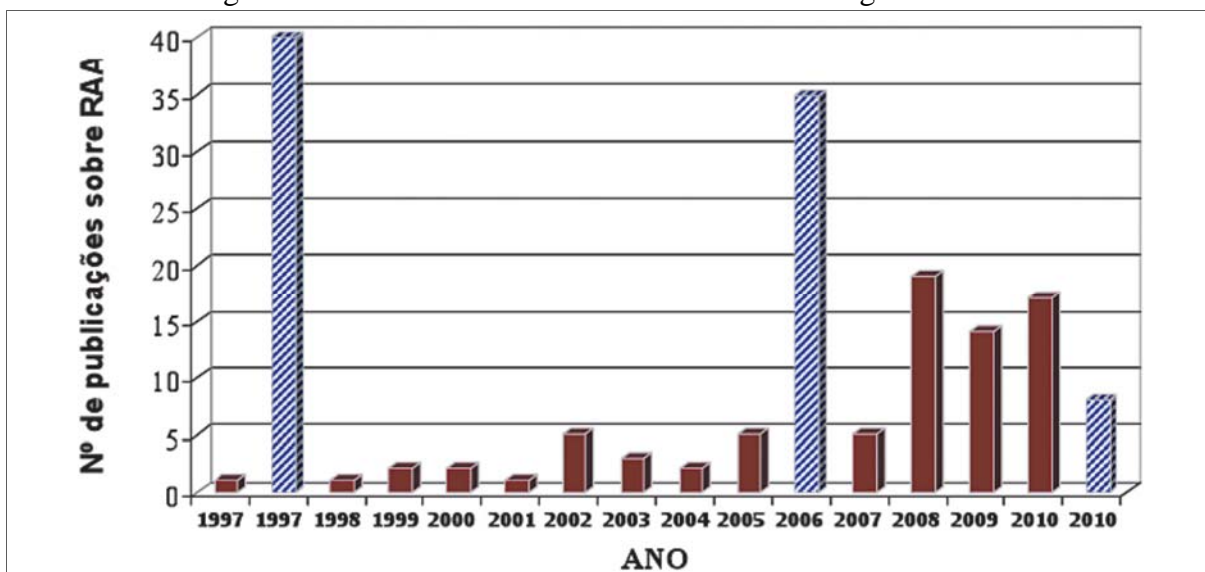
A Figura 4 mostra o número de trabalhos publicados relacionados à RAA em nível nacional no período de 1997 a 2010, com destaque para os anos em que foram realizados os eventos citados.

Figura 3- Pavimento de concreto e estrutura de ponte afetados pela RAA.



Fonte: Mizumoto (2009).

Figura 4- Estudos relativos à RAA no Brasil ao longo dos anos.



Fonte: Isaia (2011).

Apesar do crescente número de trabalhos sobre o tema, ainda não existe um consenso sobre os procedimentos a serem adotados quando a reação surge nas estruturas. Nos exemplos de barragens de UHE afetados no Brasil, são conhecidos alguns procedimentos utilizados como reparos que vão desde o reforço da estrutura de concreto até adaptações feitas nos deslocamentos de peças, que são imprescindíveis para o funcionamento dessas barragens (MARQUES, 2009).

Outros tipos de reparos incluem até a abertura e corte de juntas visando justamente acomodar a expansão causada pela reação, como é o caso do procedimento aplicado em Moxotó que, segundo Pappalardo Junior (1998), foi a primeira estrutura a ser monitorada e a receber este tipo de procedimento para contenção das expansões.

Segundo o levantamento de Marques (2009) existem outras usinas onde o procedimento adotado é somente o monitoramento da estrutura, como é o caso da UHE Jaguari, objeto deste estudo.

A construção da Usina iniciou-se em 1963 e teve sua inauguração da década de 1970 e está localizada no Rio Jaguari, entre os municípios de Jacareí e São José dos Campos (SP). O acesso à hidrelétrica é feito pela Rodovia Presidente Dutra, km 165. Sua potência instalada é de 27,6 MW e está distribuída por duas unidades geradoras com turbinas tipo Francis.

Seu reservatório tem 56 km² de extensão e sua principal finalidade é permitir o controle da vazão do Rio Paraíba do Sul, que é o fornecedor de água de várias cidades, tanto do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo, quanto do Estado do Rio de Janeiro (CESP, 2012).

No ano de 2000 foram realizadas inspeções na TA, onde se observou a existência de fissuras no concreto, que poderiam estar relacionadas com a RAA. Em 2003, a reação foi confirmada e em 2007 a CESP iniciou um projeto para avaliar o tipo de reação existente e monitorar a expansão da estrutura (SALLES, 2011).

Na Figura 5 é apresentada a estrutura da TA na época da construção da usina, com aproximadamente 64 metros de altura e, na Figura 6, sua localização com relação à UHE Jaguari.

Figura 5- Estrutura da tomada d'água durante a construção da usina.



Fonte: Salles (2011).

Figura 6- Usina Hidrelétrica Jaguari.



Fonte: Salles (2011).

2.2 Fatores interdependentes

A reação álcali agregado pode ser resumida como uma reação química entre certos tipos de agregados e os álcalis (de sódio e potássio) provenientes do próprio cimento Portland utilizado no concreto ou através de fontes externas (meio ambiente). A reação, de caráter expansivo, tem sua principal manifestação a partir do surgimento de fissuras que apresentam-se em forma aleatória (forma de mapa), sendo algumas delas maiores (TAYLOR, 1997).

Em estruturas de concreto armado as fissuras tendem a se alinhar em direção paralela à armadura longitudinal da peça. Apesar do caráter aleatório das fissuras existe a predominância na direção de maior dimensão das peças de concreto (ANDRIOLO, 1997).

Se analisada quimicamente, pode-se afirmar que é uma reação do tipo ácido-base, onde a parte alcalina fornecida pelo cimento corresponde ao sódio e ao potássio e a fase ácida provém de alguns componentes presentes no agregado.

O processo de deterioração do concreto através da RAA é lento, e assim, as estruturas afetadas não apresentam ruptura catastrófica (HASPARYK, 1999). O início das manifestações (fissuras) podem ocorrer na ordem de dias ou anos após a construção (TAYLOR, 1997).

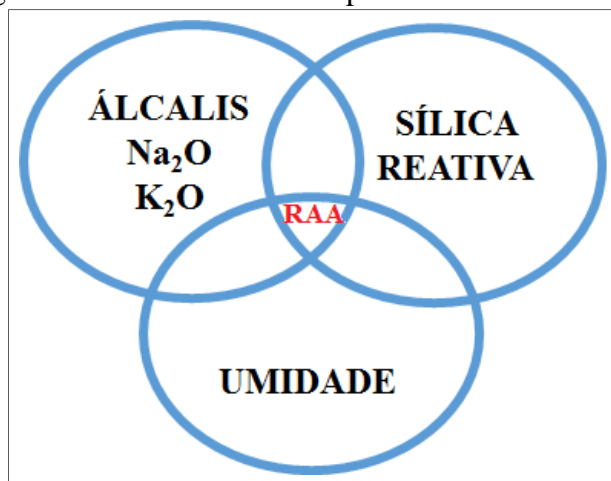
Segundo Andriolo (1997) a velocidade e a expansão total apresentada pela estrutura dependem de fatores como:

- temperatura: sendo maior a expansão quanto maior for a temperatura;
- umidade: sendo maior a expansão quanto maior for a umidade;
- teor de materiais reativos: sendo maior a intensidade da reação, quanto mais próximo estiver do teor máximo de materiais que possam reagir;
- granulometria: sendo maior a força de expansão, quanto menor for a superfície específica do material;
- confinamento da estrutura: introduzem esforços contrários à força de expansão e;
- meio ambiente: presença ou não de álcalis externos.

A formação do gel se dá através de uma reação espontânea, ou seja, os produtos da reação são mais estáveis que os reagentes (VALDUGA, 2002). Logo, uma vez iniciada a reação, não há relatos de sucesso na remediação ou na previsão das taxas de evolução das expansões, podendo-se apenas fazer uso de medidas mitigadoras na tentativa de conter as expansões residuais.

Por isso que se deve evitar ao máximo a presença simultânea dos três fatores necessários para a reação: mineral reativo presente no agregado, alto teor de álcalis no cimento e umidade suficientes (Figura 7).

Figura 7- Fatores necessários para ocorrência da RAA.



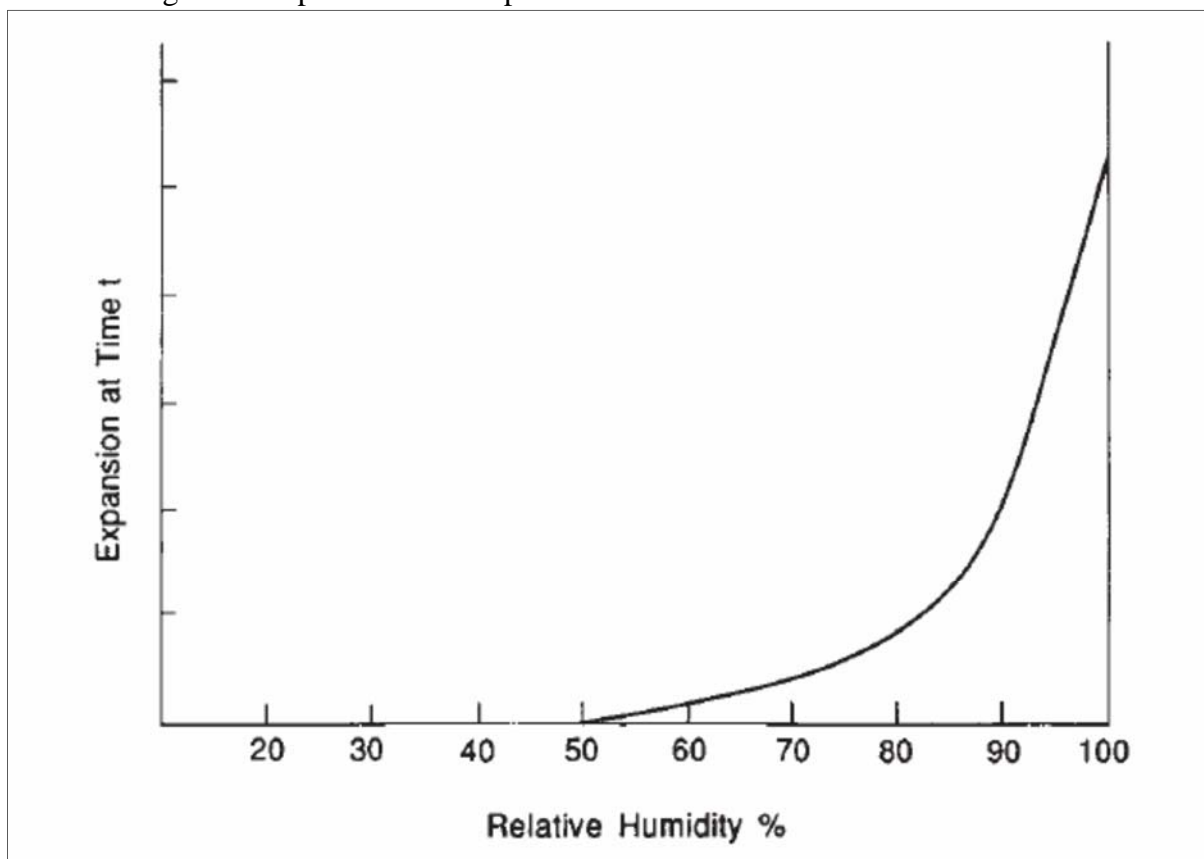
Fonte: Próprio autor.

Segundo Taylor (1997) sabe-se que os álcalis que participam na reação também podem ser provenientes de fontes externas como soluções de Na₂SO₄ ou NaCl, adições minerais ou estarem presentes no próprio agregado. A reatividade dos agregados ocorre pela instabilidade química presente em minerais mal cristalizados ou recristalizados através de processos metamórficos.

O teor de umidade necessário para a ocorrência da RAA não é unânime entre os pesquisadores, pois alguns autores relatam que uma umidade relativa do ar de 80 % é necessária para expansão do gel, embora a formação deste possa se dar em umidades relativas mais baixas (SILVA, 2009a).

O estudo apresentado por Poole (1992) demonstrou que a expansão varia de acordo com o teor de umidade, aumentando de forma exponencial com o acréscimo da mesma conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8- Expansão causada pela RAA de acordo com a umidade relativa.



Fonte: Poole (1992).

Ainda com relação à umidade, o trabalho de Hasparyk (1999) sintetiza, segundo vários autores, os efeitos da umidade na ocorrência da RAA:

- A presença dos íons alcalinos na solução dos poros é aumentada quando a estrutura de concreto é submetida a ciclos de molhagem e secagem, com umidade relativa acima de 85% (KIHARA, 1986).

- A migração dos álcalis é favorecida pela diferença de potencial e gradiente de umidade, levando a umidade dos pontos úmidos para os mais secos (XU; HOOTON, 1993).

- Em ambientes com umidade relativa abaixo de 80 % não há danos causados pela RAA (ICOLD; BULLETIN 79, 1991).

- Além do valor mínimo de 80% de umidade, é necessária também a temperatura entre 21°C e 24°C como condição necessária para ocorrência da RAA (STARK, 1991).

Porém, sabe-se atualmente que a reação ocorre em temperaturas abaixo de 21°C pois são verificadas manifestações da RAA em estruturas situadas em países ou regiões de clima predominantemente frio.

Portanto, são vários os textos que indicam o teor de umidade necessário para a ocorrência da reação: tanto com relação à umidade relativa do ar quanto com relação à

umidade do próprio concreto. Mas com relação à umidade do concreto ainda é severa a carência de estudos definitivos para mensurar a umidade existente no próprio interior do concreto.

Ao se pesquisar equipamentos que medem esse parâmetro, são encontrados vários fabricantes que fornecem dispositivos que de fato fornecem um valor indicativo de umidade, mas que não são valores quantitativos e sim qualitativos, que podem ser utilizados apenas para efeitos comparativos.

Desta forma, percebe-se que não há um consenso sobre o procedimento para obter o valor da umidade interna do concreto e, conseqüentemente, não se pode concluir sobre o valor de umidade a partir do qual ocorre a reação.

2.3 Tipos de RAA, definições e normas técnicas

A alta incidência da RAA em estruturas de concreto aumentou o interesse pelo estudo da reação e pelos produtos ou conseqüências intrínsecos a ela. No Brasil, a reação foi tema de simpósios, congressos e diversos trabalhos acadêmico-científicos. Estes trabalhos visavam caracterizar a reação e investigar estruturas afetadas mas para isso, dispunha-se apenas de normas internacionais.

Portanto, os trabalhos envolvendo o tema baseavam-se nas normas da ASTM (American Society for Testing and Materials) que indicam ensaios e procedimentos para classificar a reatividade do conjunto agregado/aglomerante conforme a potencialidade para a reação através de ensaios em barras de argamassa e em prismas de concreto. Além de indicativos quanto à análise petrográfica do agregado.

Em outros países também já vigoravam normas relativas ao tema, como as normas CSA, BS e RILEM, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2- Normas internacionais sobre o tema.

Ensaio	ASTM	RILEM	Canadá	Britânica
Análise Petrográfica	C295/C295M-12 , C856-13	AAR-1		BS 812:Part 104
Barras de Argamassa	C227-10 , C1260-07	ARR-2	CSA A23.2-25A	DD249
Prismas de Concreto	C1293-08b	AAR-3, AAR-4	CSA A23.2-14A	BS812: Part 123
Método Químico	C289			
Mitigação	C1567-13			

Fonte: Chak (2005).

Diante do número crescente de pesquisas nacionais voltadas ao estudo da RAA havia a necessidade de normas também brasileiras que contemplassem o tema. Os estudos conduzidos através da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) culminaram em uma norma atual – a NBR 15577 – em vigor desde 14 de maio de 2008, constando de seis partes que serão frequentemente citadas neste trabalho.

Algumas das premissas introduzidas nas normas da ASTM foram mantidas na norma brasileira como as dimensões e teores de materiais que compõem os corpos de provas e o limite de expansão para o ensaio de longa duração utilizando prismas de concreto. O maior diferencial encontrado foi no ensaio acelerado em barras de argamassa onde diferem a duração e a temperatura em que procede o ensaio.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT (2008) define a RAA como sendo uma reação química que ocorre entre a solução alcalina contida nos poros do concreto combinando com certos tipos de agregados (NBR 15577-1). O resultado se apresenta como uma espécie de gel expansivo que se acumula nos poros do concreto e também na interface pasta-agregado (MUNHOZ, 2007) e, como resultado da expansão do gel, é constatado o surgimento de fissuras.

São definidos três tipos de RAA: Reação Álcali-Sílica (RAS); Reação Álcali-Silicato e Reação Álcali-Carbonato (RAC).

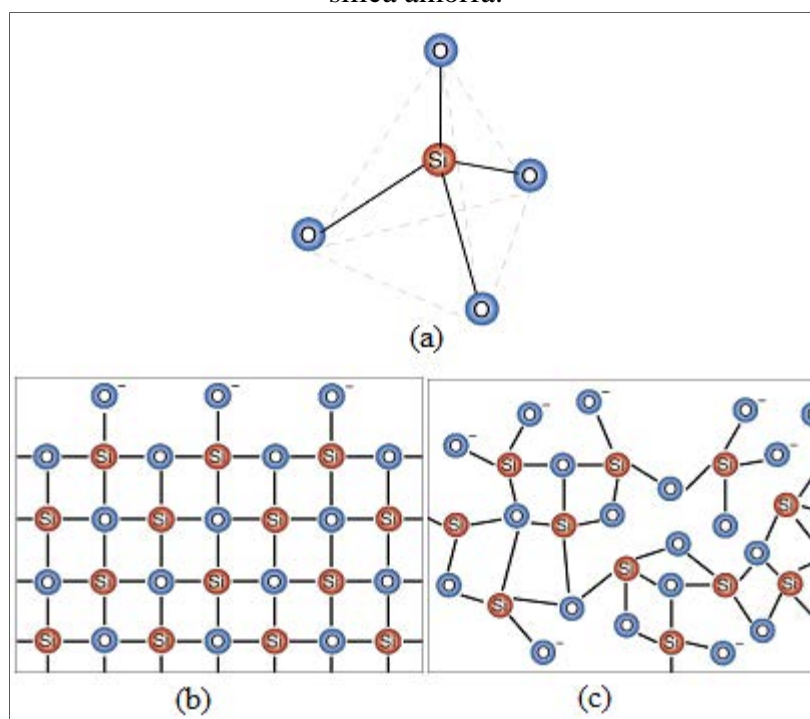
A reação álcali-carbonato é o tipo de reação menos estudada quando se fala em RAA, porque sua origem se dá quando o agregado utilizado no concreto é composto por rochas carbonáticas, resultando em um processo de desdolomitização que não tem um gel como produto final mais sim, cristais que se acumulam nos poros. Além disso, a RAC termina quando é esgotada a dolomita ou a fonte de álcalis.

Já as reações dos tipos álcali-sílica e álcali-silicato envolvem a presença da sílica (SiO₄) reativa e dos silicatos, que nada mais são do que variações das polimerizações dos

tetraedros de sílica de acordo com a razão Si:O (TEIXEIRA et al., 2002). Estes dois tipos de reação são os que resultam na criação do gel expansivo. Somando-se a isto, o fato de que os minerais silicatos constituem a classe mineral mais abundante da crosta terrestre, representando 97% da sua composição, tem-se assim o motivo pelo qual as reações álcali-sílica e álcali-silicato são as mais estudadas.

Vale observar que a sílica e alguns tipos de silicatos como o quartzo e argilominerais, por exemplo, constituem minerais pouco reativos (são quimicamente estáveis) e então, para que participem da RAA é necessário que estes minerais estejam em forma amorfa, ou seja, mal cristalizados ou tensionados (resultado de condições geológicas não ideais ou metamorfismos). A Figura 9 ilustra o hábito cristalino da sílica e sua estrutura quando em estado amorfo.

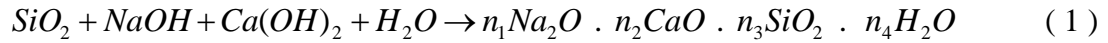
Figura 9- (a) Hábito cristalino da sílica (tridimensional) e em plano: (b) sílica cristalina e (c) sílica amorfa.



Fonte: Collins et al. (2012).

A sílica reativa que participa das reações álcali-sílica e álcali-silicato, segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2008) ocorre nos minerais: opala, tridimita, cristobalita, vidro vulcânico, entre outros. Já na reação álcali-silicato é comum a presença do quartzo tensionado por processos tectônicos e dos filossilicatos presentes em ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos e quartzitos.

A reação pode ser quimicamente descrita, porém, não há consenso no meio acadêmico. O trabalho de Mizumoto (2009) apresenta a equação geral da reação álcali-sílica dada por:



Segundo Hasparyk (2005), a reação pode ocorrer de duas maneiras. Na primeira o grupo silanol presente na superfície da sílica amorfa é ligado a íons hidroxila (OH⁻) desbalanceando a ligação Si-O e liberando água (equação 2). Os cátions presentes no concreto, provenientes do cimento, combinam-se com SiO⁻ formando o gel expansivo (equação 3). A reação é ilustrada da Figura 10 até a Figura 14 e são comumente apresentadas nos trabalhos que citam a RAA.

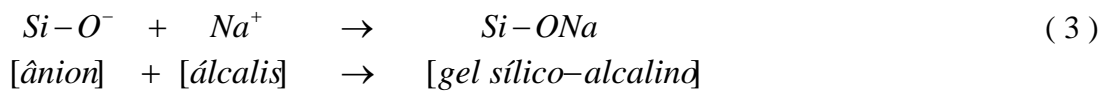
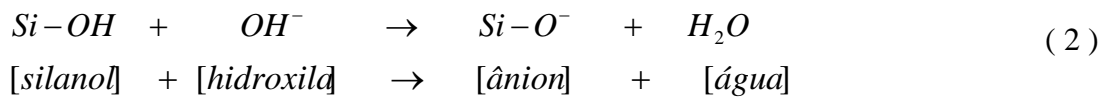
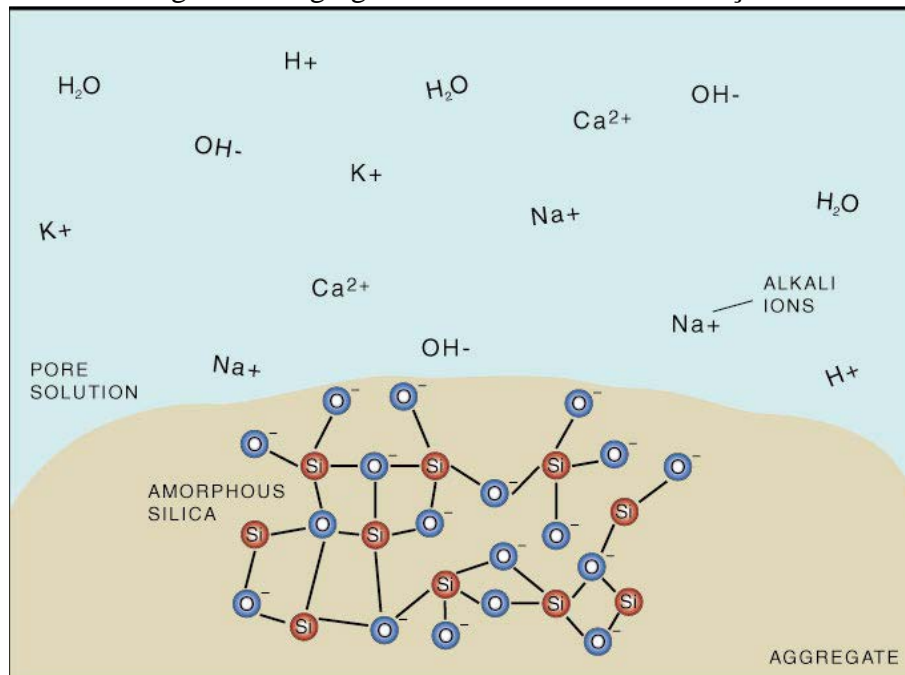
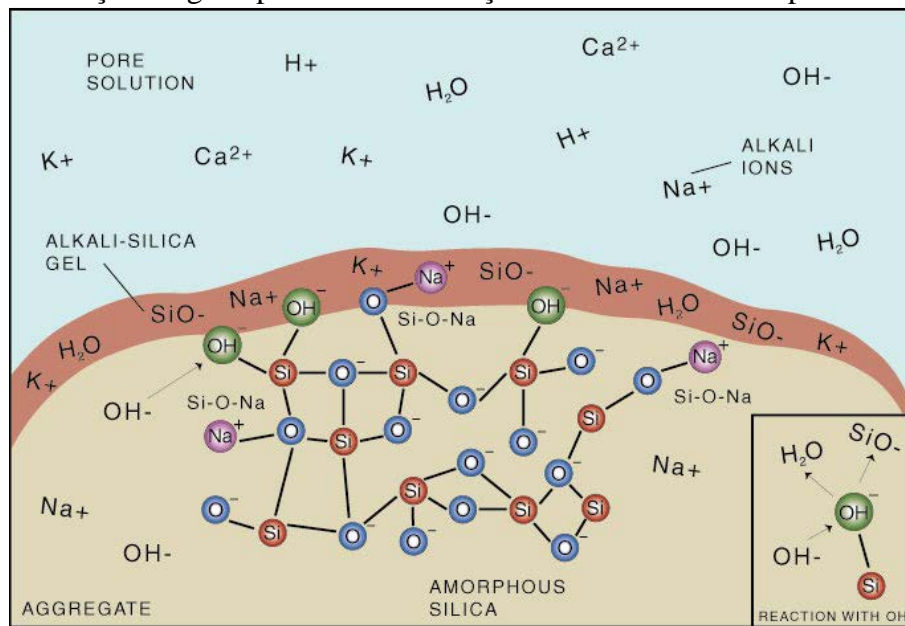


Figura 10- Agregado reativo e álcalis em solução.



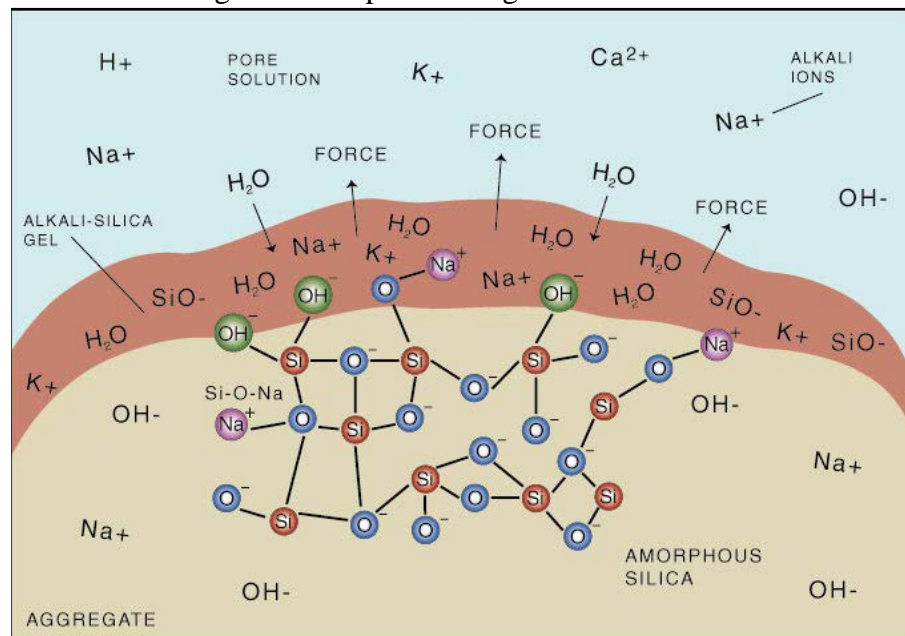
Fonte: Collins et al. (2012).

Figura 13- Formação do gel a partir da combinação do SiO^- e os álcalis presentes na solução.



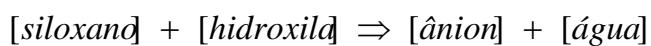
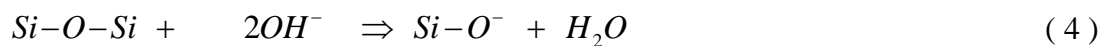
Fonte: Collins et al. (2012).

Figura 14- Expansão do gel sílico-alcálico.



Fonte: Collins et al. (2012).

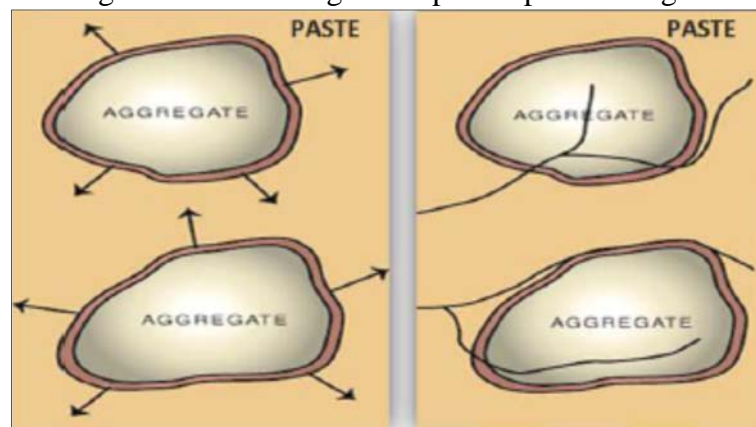
De outra forma, podem-se ter íons hidroxila em excesso atacando o grupo siloxano (Si-O-Si) separando-os em pares de SiO^- (equação 4). Posteriormente, os ânions de SiO^- são atacados pelos álcalis.



A composição química do gel varia conforme o local: se está mais perto do agregado, o gel é mais rico em sílica e à medida que o gel está mais afastado do agregado, pode ocorrer a presença abundante de cálcio em sua composição (VALDUGA, 2002).

Somente a formação do gel não é deletéria. O concreto começa a ser afetado quando, na presença de umidade, a água é absorvida por este gel criando pressões hidráulicas no interior do concreto (Figura 15 e Figura 16). Segundo Fournier e Berubé (2000) essas tensões são da ordem de 5 MPa, variando de 2 até 8,6 MPa (SILVA, 2009 a).

Figura 15- Tensões geradas pela expansão do gel.



Fonte: Collins et al. (2012).

Figura 16- Fissuras típicas da RAA.

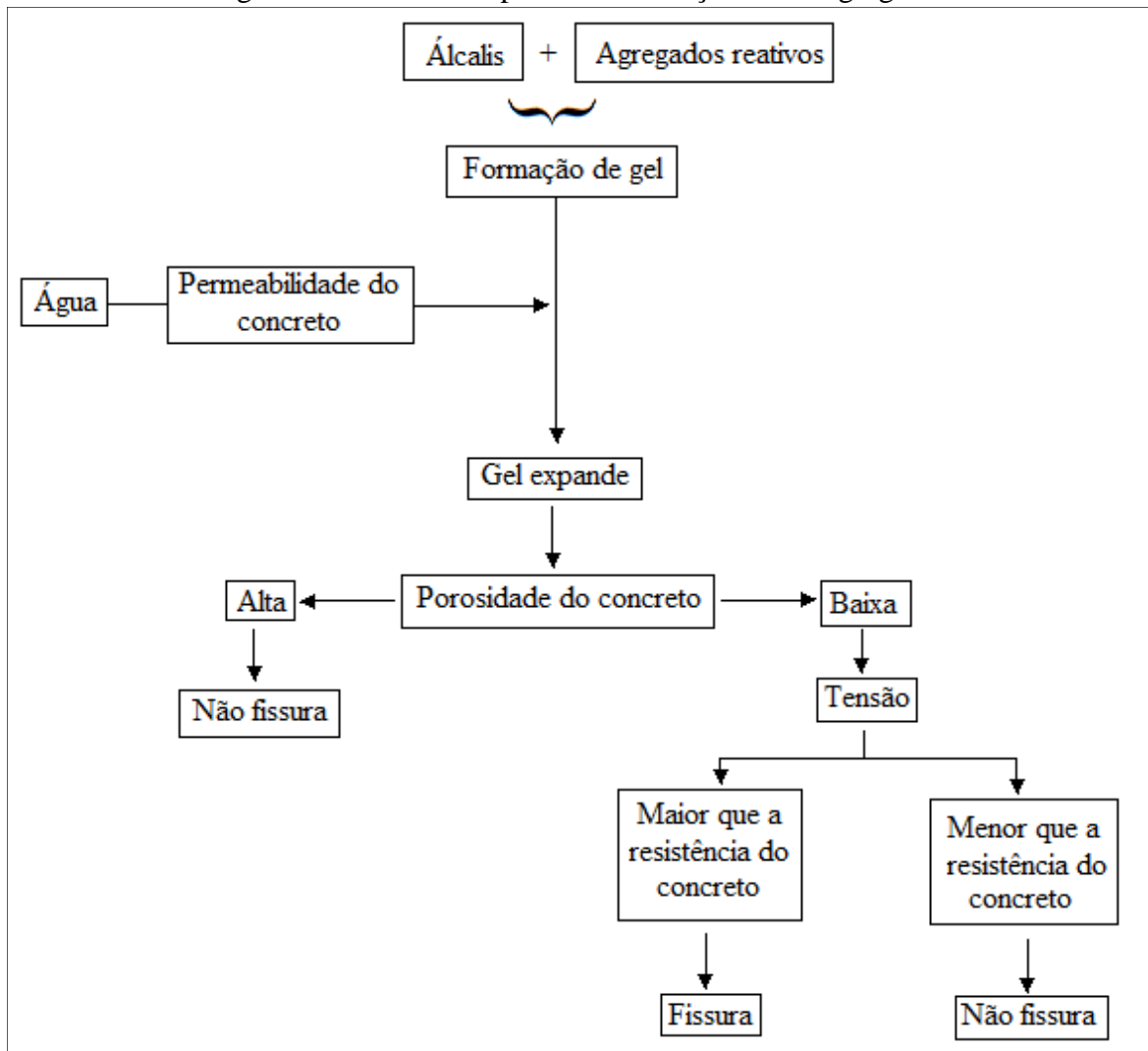


Fonte: Collins et al. (2012).

Assim, umidade participa de duas maneiras na RAA. A primeira delas é quando transporta a solução alcalina no interior do concreto e segundo, após a formação do gel, é absorvida pelo mesmo, dando origem à pressão hidráulica que causam as fissuras (POOLE, 1992).

Dependendo da porosidade, a expansão do gel pode ser “acomodada” dentro do próprio concreto sem causar danos à estrutura. Mas em concretos menos porosos, a pressão interna exercida pelo gel pode superar o limite de tração e então, começa o surgimento de fissuras (VALDUGA, 2002). Este processo é ilustrado na Figura 17.

Figura 17- Resumo do processo da reação álcali-agregado.



Fonte: Ferraris (1995).

O surgimento dessas fissuras ao longo do processo químico leva à perda da resistência mecânica, elasticidade e durabilidade do concreto (Mehta e Monteiro, 1994), além de afetar sua estanqueidade, o que permite mais entrada de água, permitindo mais ocorrência da reação e assim criando uma rotina que afeta a segurança da estrutura (MUNHOZ, 2007).

Em síntese, os principais sintomas decorrentes da RAA percebidos no concreto são, segundo Andriolo (1997):

- Fissuras e microfissuras no concreto;

- Fissuras nas proximidades da superfície dos agregados;
- Perda de aderência entre a argamassa e os agregados (descolamento);
- Ocorrência de bordas de reação ao redor dos agregados;
- Presença de gel branco preenchendo os poros ou exsudando do concreto.

Ainda segundo o mesmo autor, quando esses sintomas se manifestam em estruturas de UHEs pode-se ter os seguintes problemas:

- Desalinhamento de guias, levando ao travamento de comportas de tomadas d'água, vertedouros e equipamentos de carga como ponte rolante e pórticos;
- Comprometimento das vedações das comportas;
- Alteração de prumo de turbinas, eixos e geradores;
- Alteração do regime de ações e reações de cargas (apoios, protensões, ancoragens);
- Alteração do sistema de impermeabilização e drenagem;
- Alteração dos coeficientes de segurança das estruturas;
- Redução da durabilidade;
- Aumento da periodicidade de manutenção;
- Redução do energia gerada.

As fissuras típicas da manifestação da RAA apresentam-se superficialmente no concreto com padrões do tipo mapa. No entanto, é importante ressaltar que apenas a presença desse padrão de fissuras não é indicativo de RAA no concreto, pois o mesmo padrão também é observado em fissuras de retração por secagem, fissuração de origem térmica e principalmente por fissuras ocasionadas por reação com sulfatos.

As manifestações patológicas do ataque de sulfatos no concreto são semelhantes as da RAA e não é raro encontrar estruturas afetadas por estes dois tipos de reações deletérias simultaneamente. O ataque de sulfatos no concreto se dá pela presença de sulfatos (SO_4), reagindo com compostos hidratados do cimento, resultando na formação de gipsita e etringita (MIZUMOTO, 2010). Quando os íons de sulfatos tem origem no próprio concreto e não através de fontes externas, há também a formação da etringita, que neste caso, como acontece em uma fase posterior à da hidratação do cimento, é chamada de etringita secundária ou etringita tardia (em inglês: *DEF – Delayed Etringite Formation*).

Os cristais da etringita formados podem crescer no interior do concreto ou ainda, como característica de argilomineral que é, na presença da água são hidratados e se expandem, criando também tensões de tração internas no concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Assim, o padrão de fissuração apresentado pela *DEF* é semelhante ao da RAA e, por isso, o estudo destes dois tipos de reação são frequentemente associados e até mesmo confundidos.

Além do estudo do agregado, deve-se atentar ao elevado teor de álcalis presente normalmente no cimento e quando constatada a presença de material potencialmente reativo, deve ser feita a troca de materiais. Na impossibilidade de trocar o agregado ou o cimento (situação comum devido à disponibilidade de acordo com a região onde é feita a construção) ou quando esta condição não é suficiente, deve-se fazer uso de medidas de mitigação, conforme a NBR 15577-5 (ABNT, 2008).

Para evitar esta combinação de elementos, a ABNT recomenda uma série de ensaios que caracterizam não só os agregados e o cimento separadamente, mas também o conjunto agregados + cimento com relação à potencialidade reativa (NBR 15577, partes 1 a 6). A norma em questão cita, ainda, que na ausência de ensaios comprobatórios da natureza potencialmente inócua do agregado, o mesmo deve ser tratado como potencialmente reativo. A Figura 18 ilustra os procedimentos recomendados pela ABNT para utilização de um agregado qualquer.

Dependendo do tipo de estrutura que receberá o concreto e das condições de uso (principalmente com relação à umidade), a necessidade de avaliar e prevenir a potencialidade da reação pode ser classificada em desnecessária, mínima, moderada e forte, conforme apresentado na Tabela 3.

Com exceção das situações tidas como ação preventiva desnecessária, deve-se avaliar a reatividade potencial dos constituintes do concreto que será utilizado na estrutura. Para avaliação dos agregados pode ser utilizada, primeiramente, a análise petrográfica, onde o material, disposto em seções delgadas, é analisado através de um microscópio de luz transmitida.

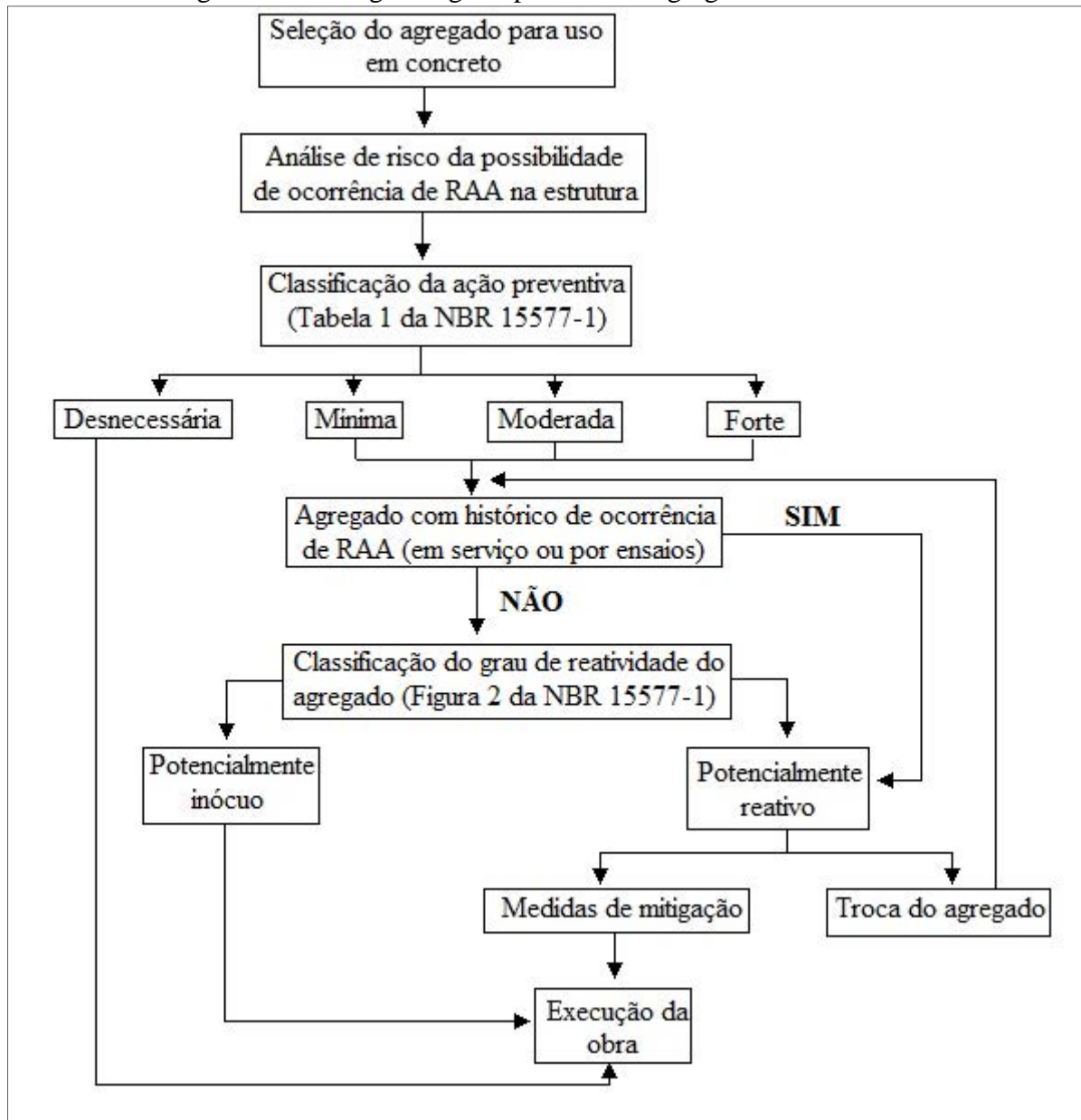
Para agregado graúdo deve-se realizar a análise petrográfica de acordo com a ABNT NBR 15577-3. Para agregados miúdos, a caracterização mineralógica é feita de acordo com os procedimentos dados pela ABNT através da NBR 7389.

De posse da lista dos minerais constituintes do agregado, deve-se então consultar a lista dos minerais potencialmente reativos citados na norma. Para classificá-lo como potencialmente inócua, a NBR 15577-3 indica os seguintes limites máximos: 5% para o quartzo deformado, 3% para a calcedônia, 1% para a tridimita ou a cristobalita, 3% para o vidro vulcânico e 0,5% para a opala.

Porém, a análise petrográfica muitas vezes não é capaz de identificar pequenos cristais, que podem ser reativos (SILVEIRA, 2012) e por isso, apenas o uso dessa análise é criticada pelos engenheiros (SANCHEZ et al., 2014). Então, somente com a análise petrográfica não é possível afirmar se determinado agregado é reativo ou não. Portanto, além

da análise petrográfica, deve-se realizar o ensaio de expansão em prismas de concreto (NBR 15577-6) e o ensaio acelerado em barras de argamassa (NBR 15577-4).

Figura 18- Fluxograma geral para uso do agregado em concreto.



Fonte: ABNT (2008).

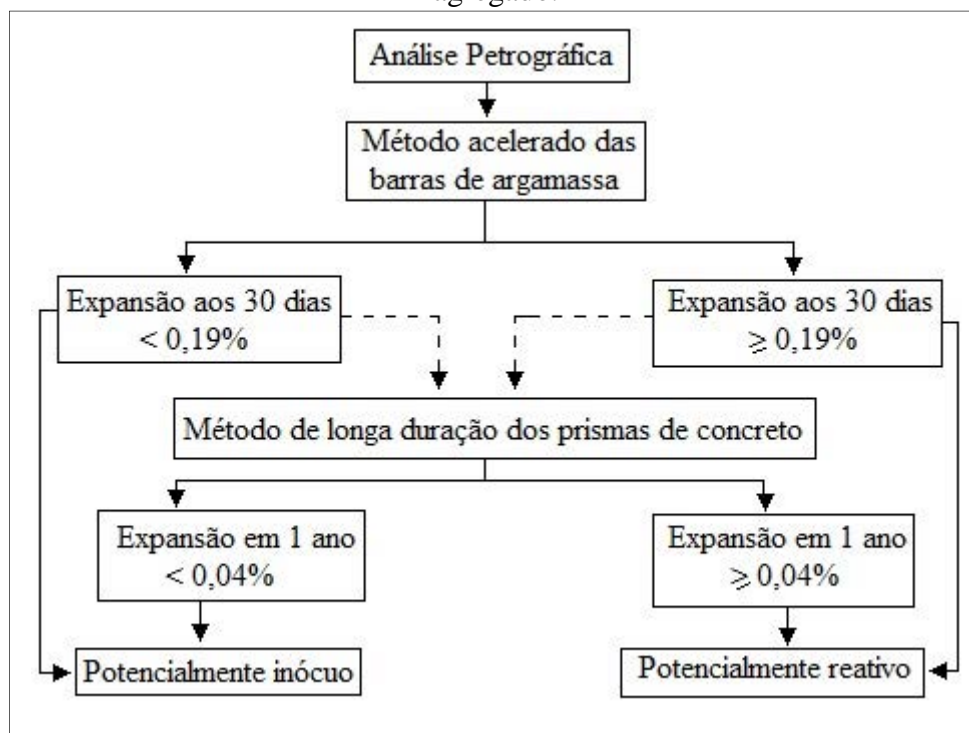
De acordo com os resultados da expansão medida nos ensaios, o agregado pode ser então definido como potencialmente inócuo ou potencialmente reativo. Os valores indicativos podem ser encontrados no fluxograma mostrado na Figura 19 tendo como valores limites: 0,19% para o ensaio acelerado das barras de argamassa e 0,04% nos ensaios de longa duração dos prismas de concreto.

Tabela 3- Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de uso.

Dimensões e condições dos elementos estruturais de concreto	Estruturas provisórias		Estruturas ou elementos estruturais correntes		Estruturas especiais	
	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	Desnecessária	Edificações provisórias não expostas a umidade atmosférica	Desnecessária	Superestrutura de obras residenciais, industriais e outros	Mínima	Superestrutura de hospitais, estações, shopping centers, estádios e outros
Maciço e seco	Desnecessária	Edificações provisórias não expostas a umidade atmosférica	Moderada	Bases internas para equipamento pesado Edifícios com revestimento externo	Forte	
Não maciço e exposto a umidade ou em contato com água	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 compostas de concreto Fundações de subestações Pré-moldados externos e de galerias Pavimentos externos 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	Mínima	Canteiro de obras Ensecadeiras galgáveis ou integralmente em concreto Fundações de edificações provisórias	Forte	Estádios Estações de tratamento de esgoto Estruturas de fundações	Forte	Infraestruturas de obras de arte Estruturas hidráulicas Estruturas de usinas termoeletricas, nucleares e eólicas

Fonte: ABNT (2008).

Figura 19- Fluxograma para classificação laboratorial do agregado quanto à reação álcali-agregado.



Fonte: ABNT (2008).

O ensaio para verificação da suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva é descrito ainda pela NBR 15577 na parte 4, no ensaio que quantifica a expansão das barras de argamassa pelo método acelerado (duração de 30 dias). O ensaio utiliza agregado miúdo classificado de acordo com a Tabela 4 e cimento padrão de acordo com a NBR 5732 e NBR 5783.

Tabela 4- Granulometria requerida para o agregado utilizado no ensaio de expansão.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,35 mm	10	99,0
2,35 mm	1,15 mm	25	247,5
1,15 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT (2008).

A dosagem da argamassa é feita de acordo com o item 6.4 da referida norma e moldada no formato de prismas com seção quadrada de $(25 \pm 0,7)$ mm e comprimento de 250

$\pm 2,5$ mm. Em cada extremidade da barra é introduzido um pino de aço inoxidável que permite o encaixe no aparato para medir o comprimento da barra por meio do relógio comparador (Figura 20).

Figura 20- Leitura do comprimento da barra.



Fonte: Mizumoto (2009).

O ensaio é conduzido mantendo-se as barras imersas em solução de NaOH na temperatura de 80°C. A Figura 21 mostra as barras de argamassa mantidas na solução de NaOH em câmara térmica e a retirada da barra para realização da leitura. Se a expansão aos 30 dias for menor que 0,19%, o agregado pode ser considerado potencialmente inócuo (item 5.3 da NBR 15577-3).

Figura 21- Barras de argamassa mantidas em solução de NaOH a 80°C.



Fonte: Mizumoto (2009).

Caso a expansão obtida no ensaio acelerado de barras de argamassa seja maior que 0,19% aos 30 dias, deve-se então proceder os métodos de mitigação indicados. É importante ressaltar que o resultado $< 0,19\%$ obtido no ensaio acelerado não é definitivo para considerar o agregado inócuo. É recomendado que mesmo nestes casos proceda-se com o ensaio de longa duração, dado pela parte 6 da NBR 15577.

O ensaio de longa duração é regido pela NBR 15577-6 (ABNT, 2008). E mantém o mesmo princípio do método dado na parte 4 da mesma norma: tentar provocar a ocorrência de RAA expondo o material a um ambiente suscetível para tal efeito. Mas nesta parte o material estudado passa a ser o concreto, cuja dosagem e moldagem seguem os itens de 4 a 8 da norma. O agregado miúdo deve ter sido classificado como potencialmente inócuo e granulometria dada pela Tabela 4 e o agregado graúdo deve satisfazer as proporções dadas na Tabela 5.

Tabela 5- Granulometria requerida para o agregado graúdo utilizado no ensaio de expansão.

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

Fonte: ABNT (2008).

As amostras moldadas são prismas com seção quadrada de $(75 \pm 0,7)$ mm. O comprimento permanece o mesmo $(250 \pm 2,5)$ mm). A particularidade deste ensaio está no armazenamento dos prismas, que é feito na temperatura de 38 °C. Os prismas são acomodados na posição vertical dentro de recipientes como mostrado na Figura 22 ou em câmaras térmicas.

Abaixo dos prismas é mantida uma lâmina de água que não atinge a base dos mesmos. As leituras de comprimento são feitas aos 7, 28 e 56 dias, prosseguindo com leituras mensais do terceiro até o décimo segundo mês. Para considerar o agregado potencialmente inócuo deve-se obter expansão menor que 0,04% em um ano.

Quando o agregado for considerado reativo ou potencialmente reativo, seja pela análise petrográfica ou através dos ensaios citados acima, devem-se adotar medidas de mitigação a fim de evitar a ocorrência de RAA no concreto. O material resultante da adição de substâncias mitigadoras também deve ser avaliado através dos ensaios (acelerado e de longa duração) afim de confirmar seu efeito anulativo sobre a reação. Os limites máximos de

expansão ao final dos ensaios continuam sendo os mesmos: 0,19% aos 30 dias para o ensaio acelerado e 0,04% para o ensaio de longa duração. O uso dos inibidores para a mitigação da RAA é tratado na parte cinco da NBR 15577 (ABNT, 2008).

Figura 22- Armazenamento dos prismas de concreto em baldes.



Fonte: Mizumoto (2009).

2.4 Mitigação da RAA: Sistemas e Soluções

A NBR 15577-1 (ABNT, 2008) cita a mitigação nos casos onde a investigação do agregado permitiu sua classificação como potencialmente reativo e assim, as medidas de mitigação são definidas antes da aplicação do concreto na estrutura, sendo recomendada a realização dos ensaios de expansão para confirmar se o material aplicado é eficiente para impedir a RAA. A parte cinco da norma citada acima é que trata da mitigação.

Os inibidores recomendados pela ABNT incluem desde a utilização do cimento Portland com adições pozolânicas (CP II Z) e escória de alto forno (CP II E) até adições, por exemplo, de sílica ativa e metacaulim. Estes materiais são ricos em sílica ativa e existem vários estudos que incorporam resíduos beneficiados, como a cinza da casca de arroz (HASPARYK, 2005), cinza volante proveniente da combustão do carvão pulverizado em usinas termoeletricas, escória de alto forno e fumo de sílica, que é um subproduto da fabricação de liga de ferro-silício (DECHICHI, 1998). Estes materiais tem propriedades pozolânicas, pois apresentam composição sílica ou sílica-aluminosa com textura muito fina e capazes de reagir com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, adquirindo propriedades aglomerantes (PAULON, 1981).

A norma recomenda a substituição do cimento a ser utilizado na obra por cimentos Portland com adições pozolânicas nos casos em que a intensidade da ação preventiva é mínima a moderada. Nos casos de forte intensidade é recomendada até a troca do agregado.

Neste trabalho, porém, o termo mitigação irá se referir à ação de compostos aplicados sobre o concreto após a manifestação das patologias associadas à RAA, como é o caso da UHE Jaguari, onde as adições ou substituições não puderam ser feitos devido à falta de ensaios que indicassem a reatividade do agregado na época da construção da Usina.

Pesquisas recentes sobre produtos mitigadores incluem compostos químicos a base de silanos/siloxanos, ou à base de lítio cuja eficácia já foi comprovada. Existem programas de pesquisa que aplicam ainda, reforço com polímero de fibra de carbono (*CFRP – carbon fiber reinforcement polymer*) e proteções metálicas (*steel jackets*), mas esses produtos não impedem a continuidade da reação, mas sim introduzem esforços de compressão que minimizam os efeitos expansivos da reação.

O revestimento de estruturas com produtos à base de silanos e siloxanos são indicados para o tratamento da RAA, pois quando comparados com outros revestimentos à base de silicones, é considerado o material com menor estrutura molecular, o que favorece a penetração no interior do concreto. Devido à sua natureza monomérica, os silanos requerem um longo tempo para secagem. Outros fatores também influenciam no sucesso da aplicação desses produtos como temperatura, velocidade do vento e umidade (Rust, 2009). O mecanismo de proteção à base de silanos atua através da reação entre os álcalis do concreto para formar uma resina silicosa.

Nesta seção são mostrados estudos de casos com a aplicação de diversos produtos, no intuito de diminuir ou eliminar a ação da RAA.

O primeiro exemplo é do *Maine Department Of Transportation (DOT)*, órgão que cuida das rodovias interestaduais nos EUA. O estudo está sendo desenvolvido em cinco viadutos ao longo da rodovia interestadual I-395. Nestas estruturas, já foi comprovada a reatividade dos agregados utilizados e a presença de RAA.

Em uma das estruturas, foram selecionados dois pilares afetados que receberam tratamentos distintos: um com *CFRP* (Figura 23) e outro, tratamento eletroquímico com nitrato de lítio (Figura 24).

Figura 23- Aplicação do CFRP.



Fonte: DOT (2012).

Figura 24- Aplicação do tratamento eletroquímico com nitrato de lítio utilizando malha de titânio.



Fonte: DOT (2012).

Para monitoramento da estrutura, foram instalados pinos de aço formando uma malha (ou *grid*) e caso haja deslocamento entre os pinos é sinal de que a estrutura continua se expandindo com a RAA. O painel de instrumentação com os pinos de aço é mostrado na Figura 25. Ainda não foram divulgados os resultados dos tratamentos.

Figura 25- Painel de instrumentação para monitoramento da estrutura.



Fonte: DOT (2012).

Em uma pesquisa realizada no estado do Texas entre 1998 e 2003 (ESKRIDGE et al. 2009) foi relatado o uso de dois tipos de revestimentos em estruturas prematuramente afetadas tanto pela ação da RAA como pela *DEF*.

O primeiro revestimento testado era impermeável à água no estado líquido, consistindo em três camadas de material epóxi e o segundo, permeável ao vapor d'água, feito com um produto à base de silano seguido de argamassa de cimento modificada com polímero flexível. Uma terceira amostra não recebeu tratamento.

Ao final de dois anos, o experimento mostrou que no caso do revestimento com epóxi impermeável, a expansão foi maior, devido ao alto teor de umidade que havia previamente na amostra e ficou aprisionado, ao passo que a amostra com revestimento permeável ao vapor d'água teve menos expansão.

Em outro estudo, conduzido na Ponte Elgeseter na Noruega (JENSEN, 2003), foram aplicados produtos à base de silanos, visando diminuir a expansão da estrutura, que já havia consumido 19 dos 20 cm deixados nas juntas de dilatação da estrutura.

A fim de estudar o efeito de silanos na superfície do concreto, três tipos diferentes desse produto foram testados para diminuir a umidade relativa no interior do concreto. Os testes de absorção do mono silano em pilares obtiveram bons resultados. Um dos produtos, com consistência cremosa, reduziu a umidade relativa (medida através de sensores), a partir de 5 cm da superfície, em 80% e reduziu significativamente as expansões devidas à RAA.

Figura 26- Ponte Elgeseter, na Noruega.



Fonte: Jensen (2003).

No trabalho desenvolvido por Rust (2009), na Universidade do Texas, foram testadas diferentes concentrações de produtos à base de silanos, siloxanos e resinas epóxi. A pesquisadora cita que o problema do tratamento da superfície com resina epóxi é que ela cria uma barreira impermeável à água sobre a superfície e não permite que a água interna na estrutura evapore, podendo até mesmo piorar a situação. Por isso, o uso de materiais que sejam impermeáveis à penetração da água, mas permeáveis à saída do vapor d'água é preferível, pois, na boa atuação deste, permitirá a diminuição da umidade interna do concreto (fator decisivo para ocorrência da expansão quando já executado o concreto potencialmente reativo).

Assim, os tratamentos superficiais na pesquisa de Rust (2009) incluem sistema de pintura com diferentes concentrações de silanos, resinas e tintas látex, testados em blocos de concreto com as dimensões de 71 x 38 x 38 (em cm) expostos às condições externas.

Os resultados mostraram, inesperadamente, que a menor expansão foi obtida no caso do produto com 40% de silano aplicado já sobre a superfície pintada com tinta látex e com expansão inicial de 0,1%, devida à RAA. Este resultado mostra que não foi necessária a remoção da pintura para aplicação do tratamento.

Outro resultado inesperado mostra que o produto 100% a base de silano foi menos eficaz que o produto com 40% de concentração. Uma das conclusões importantes da pesquisa foi provar a eficácia dos revestimentos silanos, pois em todos os casos, as expansões dos corpos de prova com algum tratamento foi menor do que os corpos de prova que não receberam tratamento superficial.

Em outro trabalho, também desenvolvido na Universidade do Texas, foram conduzidos estudos no Centro de Durabilidade do Concreto, visando estudar a reação em três

principais aplicações na engenharia como 1-lajes de concreto, 2- pilares circulares e 3- pavimento de concreto em pontes.

Para simular as lajes foram feitas 64 amostras onde metade foi feita com agregado reativo. As lajes tinham 91 x 91 cm e espessura de 29 cm (Figura 27). Para os pilares foram feitas 36 colunas circulares com 61 cm de diâmetro e 1,22 m de comprimento (Figura 28). Novamente, metade foi feita com agregado reativo e outra metade, não reativo. Para simular os pavimentos de pontes foram feitas 60 lajes de pontes com as dimensões 91 x 91 cm e 24 cm de altura (Figura 29). Metade com agregado reativo e metade, não reativo.

Figura 27- Corpos de prova simulando lajes.



Fonte: Resendez (2011).

Figura 28- Corpos de prova simulando pilares.



Fonte: Resendez (2011).

Figura 29- Corpos de prova simulando pavimentos de concreto em pontes.



Fonte: Resendez (2011).

Para simular as condições de uso dos materiais, os corpos de prova foram dispostos a céu aberto, conforme mostra a Figura 30.

Durante a construção dos protótipos foram instalados pinos para monitoramento da expansão. E a umidade interna foi medida através de sensores nas profundidades de 25 mm; 50,8 mm e 76,2 mm.

Figura 30- Corpos de prova expostos às condições externas.



Fonte: Resendez (2011).

Os tratamentos aplicados por Resendez foram:

Impregnação eletroquímica de nitrato de lítio: A solução de nitrato de lítio é o anodo e o reforço de aço é catodo. A solução é introduzida na estrutura através de uma voltagem constante, aplicada durante algumas semanas.

Impregnação de nitrato de lítio por vácuo: Através de placas de aço com as bordas isoladas com borracha foi possível criar um vácuo e injetar a solução de nitrato de sódio.

Tratamento superficial de nitrato de lítio: Com o uso de um spray foi aplicado superficialmente uma quantidade de 0,37 l/m². Algumas estruturas tiveram uma aplicação única e outras, aplicações semanais que foram de 20 até 36, no total.

Produtos à base de silanos: Foram testados produtos com concentrações de silanos de 40 % e 100 %.

Tratamentos comerciais: Eliminator® e BridgeMaster®. O Eliminator® é uma membrana dupla impermeável e o BridgeMaster® é um polímero que tem cura rápida e é composto por metil-metacrilato. Antes da aplicação do produto, a superfície desbastada com jatos de areia e recebeu uma camada de epóxi.

Foi aplicada ainda, uma camada de asfalto sobre as lajes com ou sem os tratamentos comerciais. Em outras, a camada foi de concreto com traço pobre e agregado não reativo.

Os resultados da pesquisa de Resendez (2011) mostraram que as expansões observadas nas estruturas tratadas com nitrato de lítio foram próximas às da amostra de controle (sem tratamento), mostrando que o tratamento tem um pequeno impacto no controle da expansão. Já com o tratamento com produto silano, o pesquisador teve redução da expansão. Para as aplicações com 100% de silano as expansões foram menores. A cobertura asfáltica não inibiu a expansão, afinal é uma camada espessa que impede a saída de água na direção vertical e a cor escura aumenta a temperatura, aumentando assim a potencialidade da reação.

Outra pesquisa envolvendo a aplicação de silanos e nitrato de lítio foi desenvolvida por Silva (2009b). No trabalho foram utilizadas barras de argamassa com agregado reativo. Os tratamentos superficiais únicos ou múltiplos incluíram produtos com variadas concentrações de metiltrimetoxisilano e octiltrióxido de silano e também um tratamento à base de lítio. Em alguns casos, os tratamentos foram aplicados antes das barras começarem a apresentar expansões devido à RAA. Em outros, o tratamento foi utilizado para mitigar as expansões já causadas pela mesma.

O tratamento com lítio teve o melhor resultado e dependendo do modo de aplicação, o segundo melhor resultado variou nas concentrações do octiltrióxido de silano. As aplicações múltiplas foram mais eficientes na diminuição das expansões. Mas, analisando-se a viabilidade econômica, ainda é mais vantajoso utilizar os produtos à base de silanos, visto que o tratamento com lítio envolve alto custo.

Vale lembrar que para a ocorrência da RAA é necessária, além da presença do agregado reativo e do cimento com alto teor de álcalis, um teor de umidade suficiente. Por isso, as pesquisas atuais são principalmente voltadas ao uso de produtos impermeabilizantes como mitigadores da reação. Portanto, com o intuito de diminuir as expansões da estrutura da TA da UHE Jaguari é também recomendada a aplicação desse tipo de produto, após a verificação de sua eficiência através do procedimento experimental conduzido neste trabalho.

3 ESTUDO DE CASO: TOMADA D'ÁGUA DA UHE JAGUARI

No projeto P&D desenvolvido a partir de 2007, foi discutido o tipo de reação presente na TA da UHE Jaguari (MARQUES, 2009), adaptado um método colorimétrico portátil para identificação rápida da reação (Mizumoto, 2009) e instalado um sistema de monitoramento para verificar a expansão da estrutura da TA (ZOILO, 2010).

Assim, o presente capítulo será dividido em três partes. A primeira parte diz respeito às pesquisas feitas na UHE Jaguari para a constatação da reação. A segunda parte aborda o sistema de monitoramento que foi implantado na Usina, bem como a divulgação dos dados atualizados referentes ao monitoramento. A terceira parte consiste na análise e discussões sobre a ampliação do sistema de monitoramento instalado na Usina.

3.1 Diagnóstico positivo para RAA no concreto

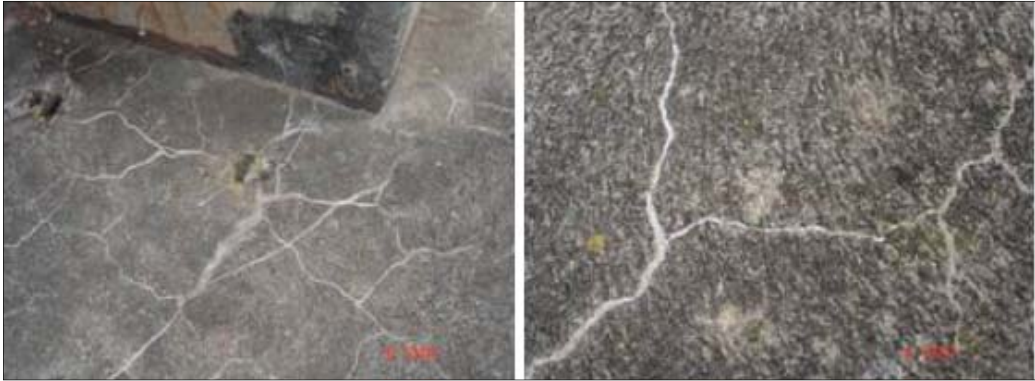
Desde o surgimento das fissuras presentes da TA da UHE Jaguari, já se suspeitava da ocorrência da reação álcali-agregado, visto que a estrutura apresentava fissuração característica. Mas, como já citado anteriormente, podem-se ter outras reações que afetam o concreto cujas manifestações podem ser confundidas com a RAA, como a ocorrência da etringita tardia (*DEF*).

Então, para confirmar efetivamente a presença da RAA foram conduzidos alguns procedimentos que serão brevemente listados a seguir. Para maiores detalhes, consultar Marques (2009).

A inspeção visual, realizada em visita técnica, evidenciou a presença de fissuras características na RAA na TA da Usina, conforme pode ser visualizado na Figura 31. E ainda, uma fissura bem preocupante, localizada na laje da TA, onde percebe-se sua evolução de 1997 até 2007, mostrada na Figura 32.

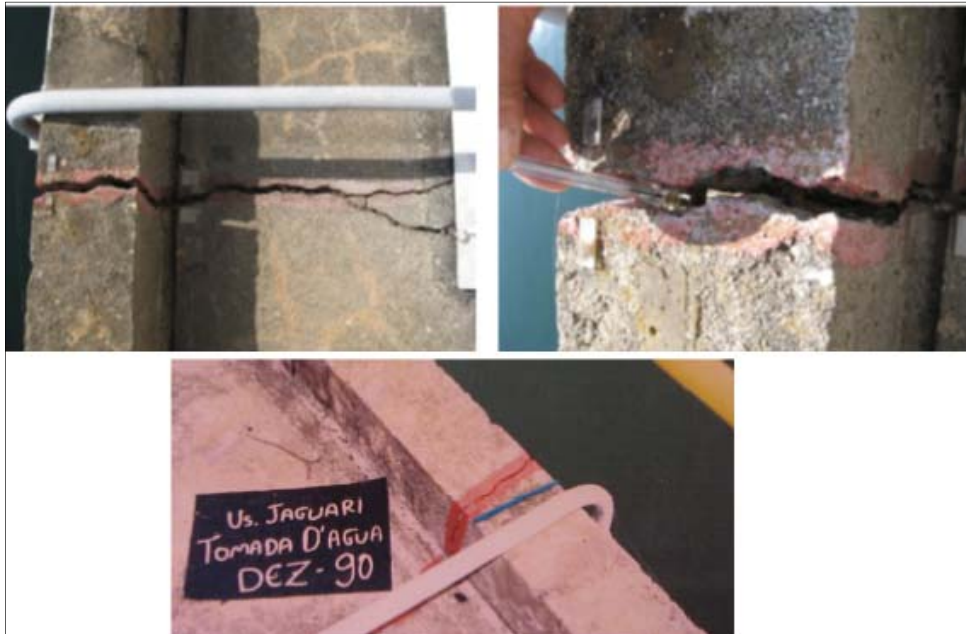
Os pilares do pórtico de carga da TA também apresentam fissuras verticais. E também, os muros onde estão inseridas as guias metálicas para condução da viga enscadeira (ou “*stop log*”) e da grade protetora, onde se pode observar que as mesmas já apresentam deslocamento diferencial, devido à expansão da estrutura (Figura 33).

Figura 31- Fissuras tipo mapa na laje da TA preenchidas com material branco.



Fonte: Marques (2009).

Figura 32- Fissura na laje da TA com 10 mm de abertura e sua situação em 1990.



Fonte: Zoilo (2010).

Figura 33- Fissuras no muro-guia e o deslocamento diferencial da guia metálica.



Fonte: Zoilo (2010).

Além da inspeção visual, foram também realizados ensaios para avaliar a reatividade de materiais que poderiam caracterizar o agregado utilizado no concreto da estrutura. Para tanto, os materiais utilizados na pesquisa de Marques (2009) foram: (a) agregado coletado do enrocamento da barragem, (b) agregado comercial da pedreira Santa Isabel e (c) testemunhos extraídos da rocha de fundação da TA da usina.

O agregado extraído do enrocamento foi estudado por se acreditar que deve ser o mesmo agregado utilizado no concreto da barragem. Já o agregado da pedreira Santa Isabel foi escolhido por estar próximo à barragem, cujo material é extraído da mesma formação litológica do material do enrocamento.

Os materiais foram submetidos a ensaios de expansão de acordo com a NBR 15577 (partes quatro e seis) e os resultados indicaram que os agregados podiam ser classificados como potencialmente inócuos. Já em outro ensaio de expansão, similar ao ensaio de longa duração com prismas de concreto, mas conduzido de modo acelerado a 60°C e durante 180 dias, a pesquisadora obteve um resultado de expansão maior que 0,04% ainda no segundo mês, indicando que o agregado da Pedreira Santa Isabel é potencialmente reativo.

Além dos agregados, o próprio concreto da TA da Usina foi investigado através da extração de testemunhos para inspeção visual em laboratório, ensaios de expansão residual e análise petrográfica.

A inspeção visual dos testemunhos extraídos da Usina mostrou resultados típicos da presença de RAA como manchas escuras na argamassa em torno dos agregados denominadas como bordas de reação (Figura 34), poros preenchidos por material branco (Figura 35) e descolamentos entre a pasta e o agregado (Figura 36) evidenciando a presença de fissuras na argamassa e/ou nos agregados.

O ensaio de longa duração, feito diretamente nos testemunhos extraídos, apresentou expansão menor que 0,04 % e ainda, com tendência decrescente.

A análise petrográfica, realizada através de microscopia óptica de luz refletiva, mostrou a presença do gel branco, resultado da RAA, no contato entre o agregado e a argamassa, e frequentemente preenchendo os poros do concreto.

Figura 34- Bordas de reação.



Fonte: Marques (2009).

Figura 35- Poros preenchidos por material branco.



Fonte: Mizumoto (2009).

Figura 36- Fissuras entre pasta e agregado.



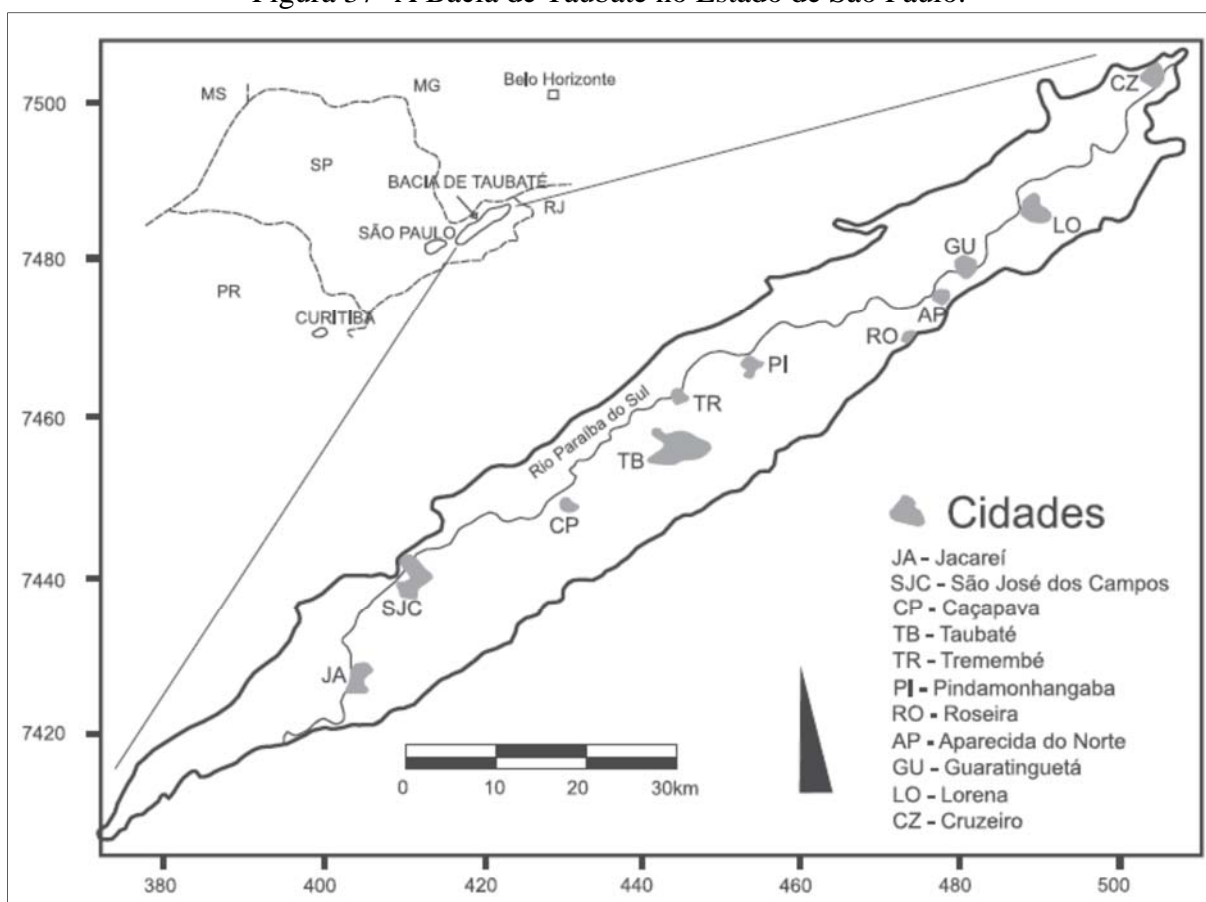
Fonte: Marques (2009).

Na pesquisa de Mizumoto (2009) também foi confirmada a presença do gel expansivo resultante da RAA. Durante o trabalho, o pesquisador adaptou um kit de testes colorimétricos, portátil e de fácil execução que pode ser utilizado no momento da visitação ao local afetado.

Os testes colorimétricos foram feitos diretamente nos testemunhos coletados da TA e indicaram a presença do gel expansivo, sendo o mesmo confirmado posteriormente através da análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Então, apesar do resultado de alguns dos ensaios de expansão conduzidos por Marques (2009) mostrarem os agregados como potencialmente inócuos foi constada a presença do gel expansivo nos testemunhos extraídos da TA confirma a RAA da estrutura.

Figura 37- A Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.



Fonte: Carvalho e Vidal (2011).

Outro fato que pode ser utilizado para confirmar a existência da RAA na UHE Jaguari é através de análise da geologia do local, visto que os agregados utilizados na construção correspondem ao material disponível nas proximidades. De acordo com Marques (2009), a UHE Jaguari foi construída diretamente sobre o embasamento pré-cambriano da Bacia de Taubaté (representada na Figura 37), e Davino (2000) descreve um afloramento dessa rocha a oeste da cidade de Caçapava - SP. Essas informações levam a propor que os materiais utilizados como agregados disponíveis na região correspondem às rochas do embasamento pré-cambriano.

De acordo Carvalho e Vidal. (2011), o embasamento da Bacia de Taubaté é representado por rochas ígneas e metamórficas datadas desde o Paleoproterozoico até o Neoproterozoico (Eras que correspondem de 2500 a 630 milhões de anos atrás). E a Bacia teria se formado no Cenozoico (~65,5 Ma) juntamente com outras bacias com origem devido ao sistema de *Rifts* Continental do Sudeste do Brasil.

Considerando que este sistema de *rifts* envolve a geração de falhas e atividade tectônica, o resultado se mostra em forma de metamorfismos e tensionamentos nas rochas envolvidas. Sabendo-se que o quartzo tensionado é uma das formas de sílica reativa, pode-se afirmar que o agregado utilizado na UHE Jaguari deve ser considerado definitivamente reativo.

3.2 Monitoramento da estrutura da TA

Como já citado neste trabalho, o produto resultante da RAA é um gel branco que, na presença de umidade, apresenta expansões que desencadeiam uma série de problemas nas estruturas de concreto. No caso de uma UHE, podem-se ter graves problemas resultantes dessa expansão, como a movimentação de juntas de contração e de concretagem, travamentos ou deslocamentos de equipamentos e peças móveis como turbinas, eixos e pistões. Estes problemas podem, claramente, afetar o funcionamento de uma UHE.

De acordo com Silveira (2006), o monitoramento desse tipo de estrutura deve:

- Verificar e quantificar a taxa de expansão anual;
- Possibilitar o desenvolvimento de modelos matemáticos de análise do comportamento da barragem possibilitando o estudo de soluções corretivas, quando necessário;
- Verificar a eficiência de reparos na estrutura e
- Acompanhar a deformação da estrutura ao longo do tempo.

Ainda segundo o mesmo autor, as grandezas que devem ser observadas nos sistemas de monitoramento de barragens são:

- Alteamento e deslocamentos horizontais da crista da barragem;
- Deslocamentos diferenciais entre blocos;
- Deslocamentos angulares da barragem;
- Deformações internas da estrutura e
- Vazões de drenagem.

No caso da UHE Jaguari, o monitoramento da estrutura começou a ser feito logo no início das investigações sobre as causas das fissuras da TA, em 2000. É importante enfatizar que o monitoramento dessa estrutura é essencial para garantir o funcionamento da mesma, visto que no caso de expansões significativas que comprometam a descarga e exijam providências de manutenção e/ou correção imediatas, a descarga mínima à jusante, que abastece a população da região do Vale do Paraíba e do sul do Estado do Rio Janeiro, pode ser comprometida.

Neste caso, é interessante que se tenha um sistema que permita o monitoramento das estruturas passíveis de travamento, como é o caso das guias metálicas instaladas nos muros na parte frontal da TA. Pelas guias metálicas são conduzidas as grades de proteção e comportas ensecadeira, que controlam a vazão da usina.

Essas guias já tem apresentado deslocamento diferencial e o conhecimento prévio real desse deslocamento pode ser decisivo na adoção de medidas preventivas para operação da Usina. Assim, A CESP tem investido no monitoramento na TA da UHE Jaguari e a seguir, será apresentado o sistema de monitoramento instalado.

Buscando avaliar a evolução e surgimento de novas fissuras na laje da TA, em agosto de 2008 foram feitos mapeamentos das fissuras em uma área da laje da TA e em outra área no pilar três (P3) do pórtico de carga. Esse mapeamento consiste na fixação de um filme plástico em uma área predeterminada e a marcação das fissuras existentes com caneta sobre esse filme.

De tempos em tempos, esse filme pode ser fixado novamente no mesmo lugar, podendo-se tanto atualizar o surgimento de novas fissuras quanto comparar a evolução das fissuras antigas utilizando uma caneta de cor diferente. O mapeamento foi repetido um ano depois e não apresentou diferenças notáveis.

Para monitorar as aberturas das fissuras aleatórias em formato de mapa, frequentes na laje da TA, foram utilizados medidores tri-ortogonais (MT) e bases para medição dos movimentos de fissuras (BT). A elevação da estrutura tem sido monitorada através de extensômetros de hastes múltiplas e também por técnicas geodésicas. Além disso também existe um monitoramento dos deslocamentos entre os muros guias.

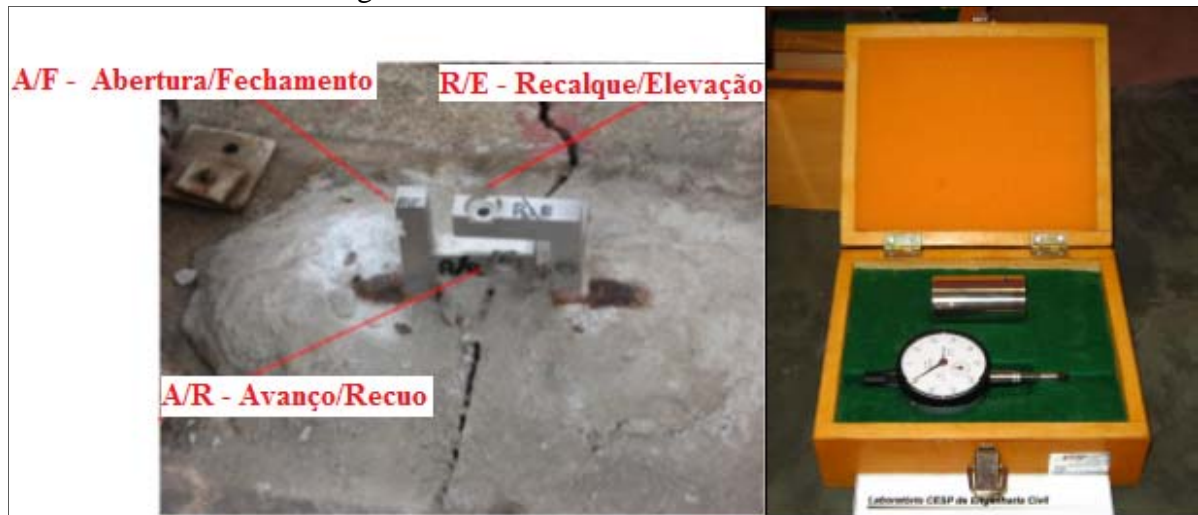
Os equipamentos instalados, bem como os dados referentes a eles são apresentados a seguir.

- Medidores tri-ortogonais e bases para medição dos movimentos de fissuras:

O princípio de funcionamento dos medidores tri-ortogonais (MT) se baseia no uso de três braços de aço inoxidável orientados em três direções ortogonais, onde o deslocamento

entre eles é medido através de um relógio comparador, adaptado pela CESP (Zoilo, 2010). As leituras são obtidas com precisão de 0,01mm e permitem conhecer os deslocamentos referentes a Abertura/Fechamento (A/F), Recalque/Elevação (R/E) e Avanço/Recuo (A/R). A Figura 38 mostra um MT já instalado sobre uma fissura e o relógio comparador utilizado para medir os deslocamentos.

Figura 38- Leituras do MT sobre a fissura.



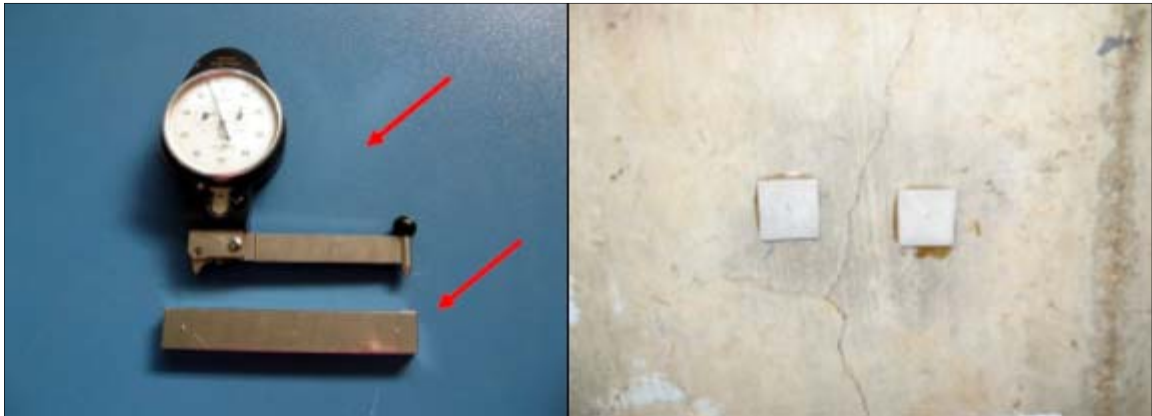
Fonte: Zoilo (2010).

Os MT foram os primeiros instrumentos instalados para monitoramento da estrutura e foram dispostos tanto na laje da TA, como também em dois pilares do pórtico de carga, vigas laterais e na câmara do servomotor. Os deslocamentos obtidos por estes medidores permitem avaliar a expansão da estrutura.

Além dos medidores triortogonais, é também comum o uso de bases para medição dos movimentos de fissuras (BT), que consiste no monitoramento da abertura de fissuras através de placas de alumínio instaladas próximas às fissuras. O aparelho de leitura, o gabarito para instalação e o conjunto BT instalado são mostrados na Figura 39.

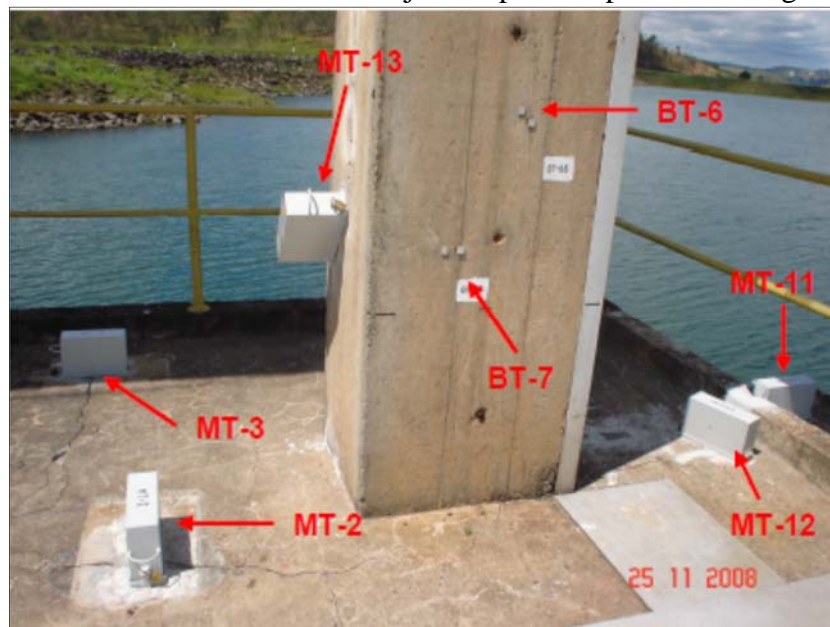
Na Figura 40 é apresentada uma visão da laje da TA mostrando alguns dos MT e BT instalados. Os dois tipos de medidores permitem avaliar o deslocamento diferencial entre blocos.

Figura 39- Aparelho de leitura, gabarito para fixação e conjunto de BT instalado na fissura.



Fonte: Zoilo (2010).

Figura 40- BT e MT instalados na laje e no pilar do pórtico de carga da TA.



Fonte: Zoilo (2010).

Atualmente estão em funcionamento dezessete MTs em toda a estrutura da UHE Jaguari e os dados são mantidos atualizados através do Sistema Cesp de Segurança de Barragens (SICESP). A Tabela 6 indica os locais onde estão instalados os medidores tri-ortogonais. Note-se que o MT-15 e MT-16 substituem, respectivamente, o MT-2 e o MT-13 pois os mesmos estavam danificados.

Tabela 6- Localização dos medidores tri-ortogonais.

Denominação	Local de instalação
MT-1	Laje da TA
MT-2	Laje da TA
MT-3	Laje da TA
MT-4	não informado
MT-5	não informado
MT-6	não informado
MT-7	não informado
MT-8	Viga lateral
MT-9	Pilar P2 na TA
MT-10	Viga lateral
MT-11	Entre muro guia 2 e a laje
MT-12	Laje da TA
MT-13	Pilar P3 na TA
MT-14	Câmara do servomotor
MT-15	substitui o MT-2
MT-16	substitui o MT-13
MT-17	Junta - bacia de dissipação?
MT-18	Junta - bacia de dissipação?
MT-19	Junta - bacia de dissipação?

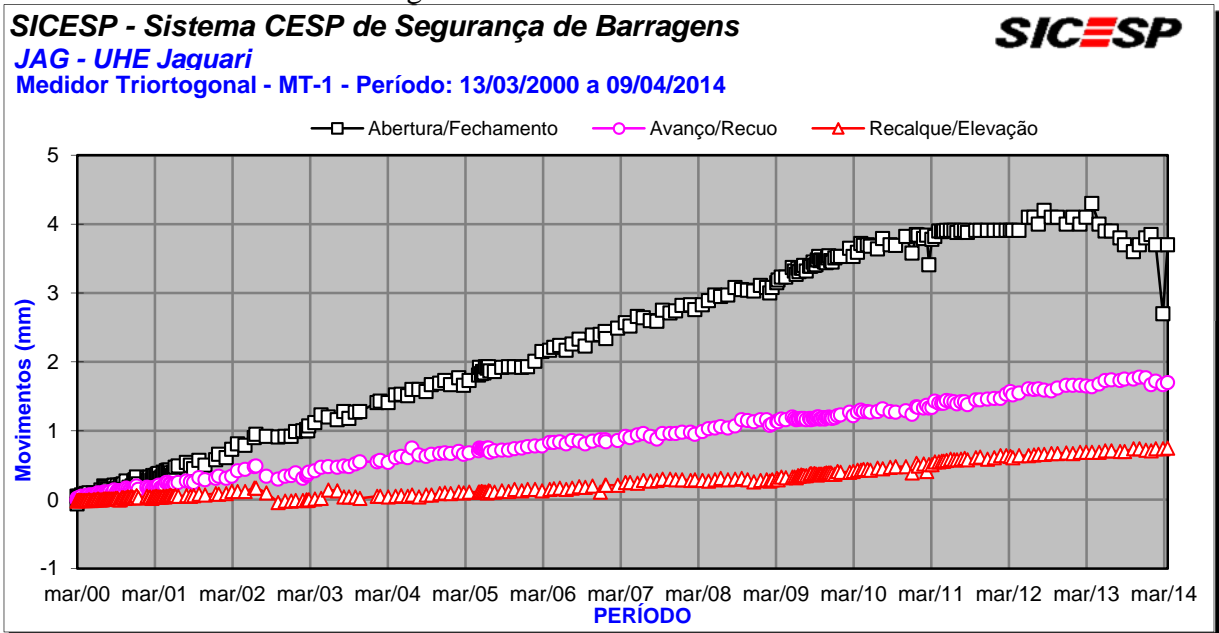
Fonte: Zoilo (2010) e informações SICESP.

Os deslocamentos apresentados pelos MTs são mostrados nas Figura 41 a Figura 57, com exceção dos medidores danificados.

Observando-se os deslocamentos apresentados pelos medidores tri-ortogonais, nos gráficos com tempo de acompanhamento suficiente para tal, constata-se claramente que a estrutura ainda está em expansão.

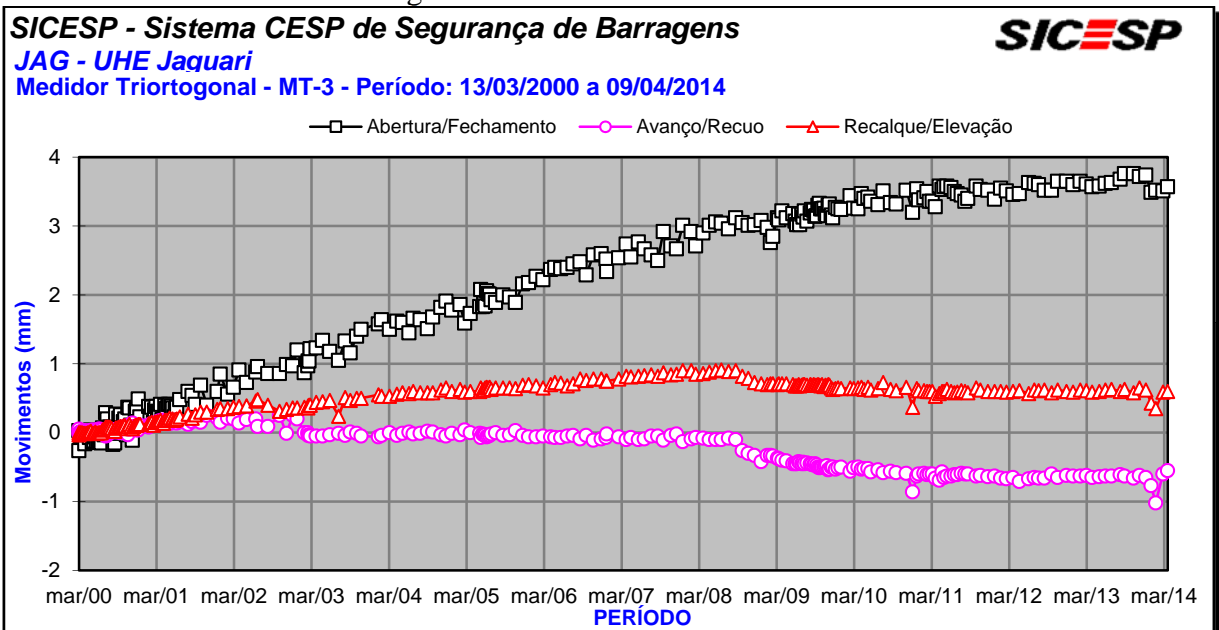
A Figura 41 e a Figura 42 mostram os deslocamentos dos MT 1 e 3, respectivamente, no período de março de 2000 até abril de 2014. Pode-se observar que nos primeiros anos de monitoramento a taxa de abertura aumentou linearmente e a partir de 2011 vem se estabilizando, mostrando que as expansões do local estão diminuindo.

Figura 41- Deslocamentos do MT1.



Fonte: CESP (2014).

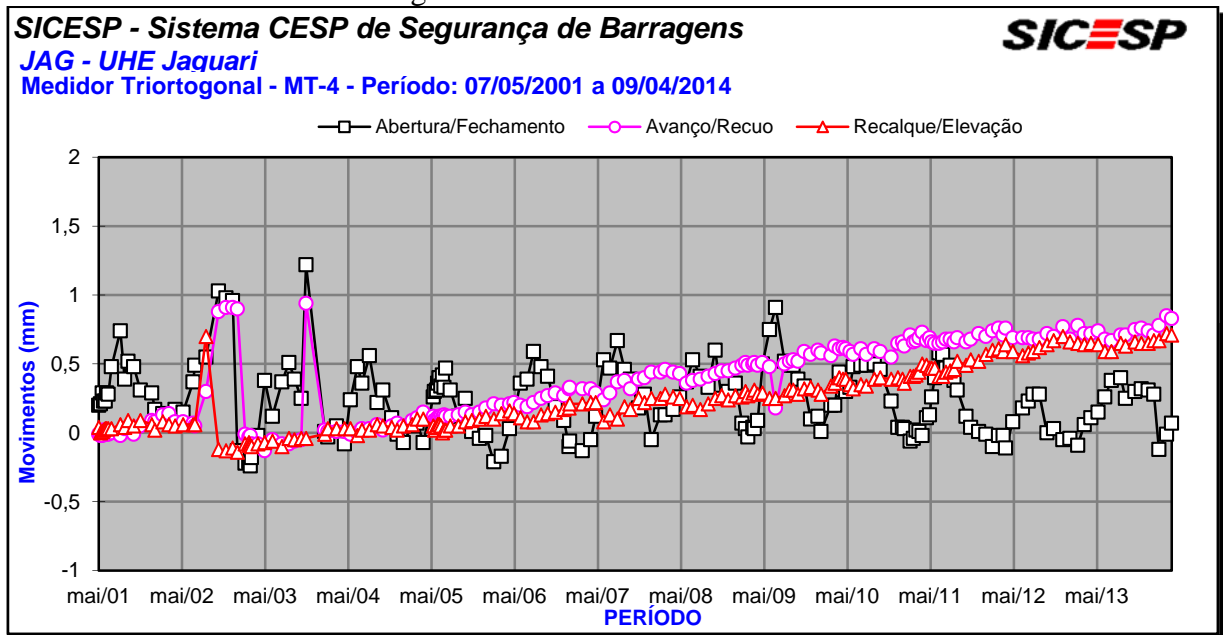
Figura 42- Deslocamentos do MT3.



Fonte: CESP (2014).

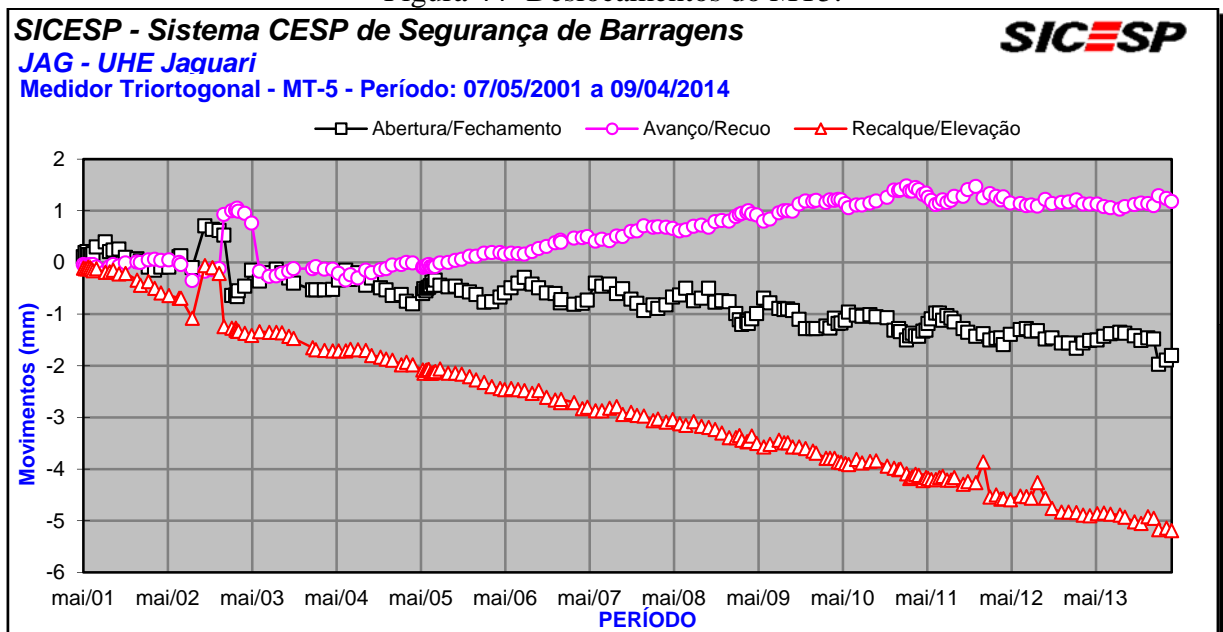
Da Figura 43 até a Figura 46, tem-se os deslocamentos dos MT 4 ao MT 7, no período de maio de 2001 a abril de 2014. Notam-se deslocamentos menores do que dos MTs anteriores, com exceção do MT 5, que tem apresentado deslocamentos maiores, principalmente no recalque/elevação.

Figura 43- Deslocamentos do MT4.



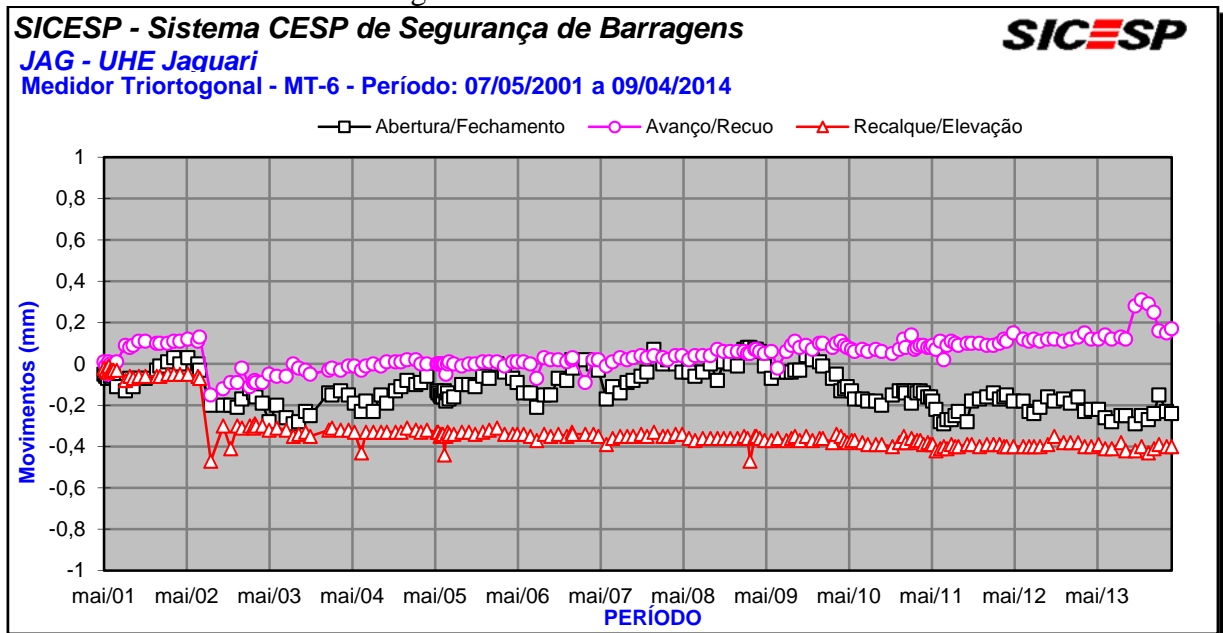
Fonte: CESP (2014).

Figura 44- Deslocamentos do MT5.



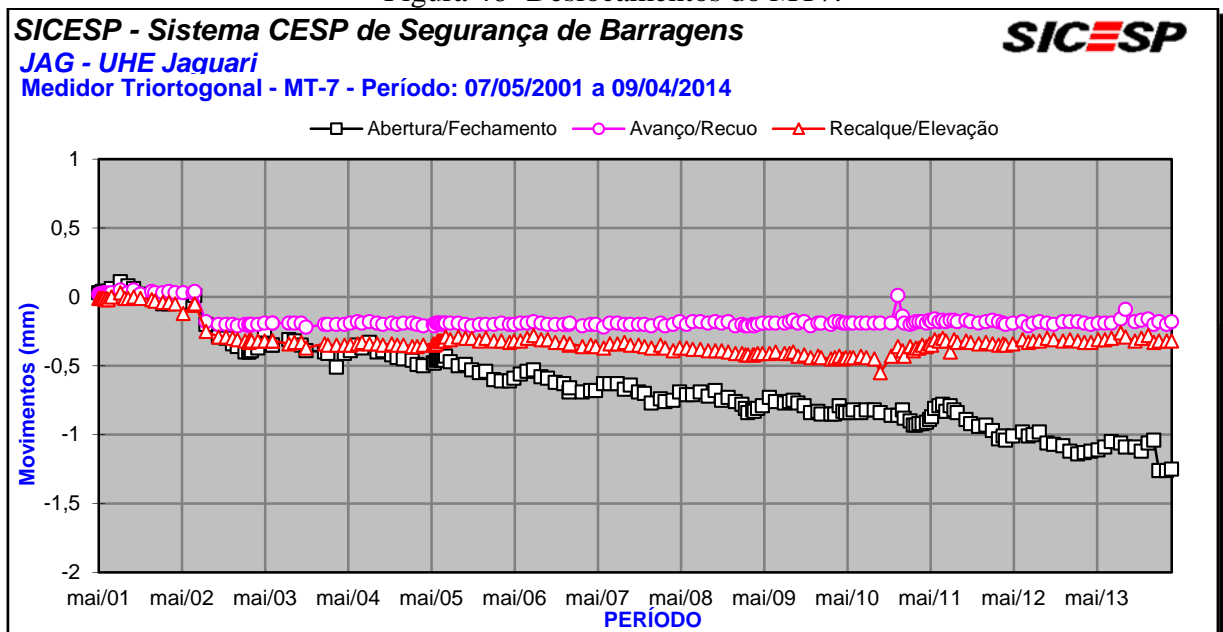
Fonte: CESP (2014).

Figura 45- Deslocamentos do MT6.



Fonte: CESP (2014).

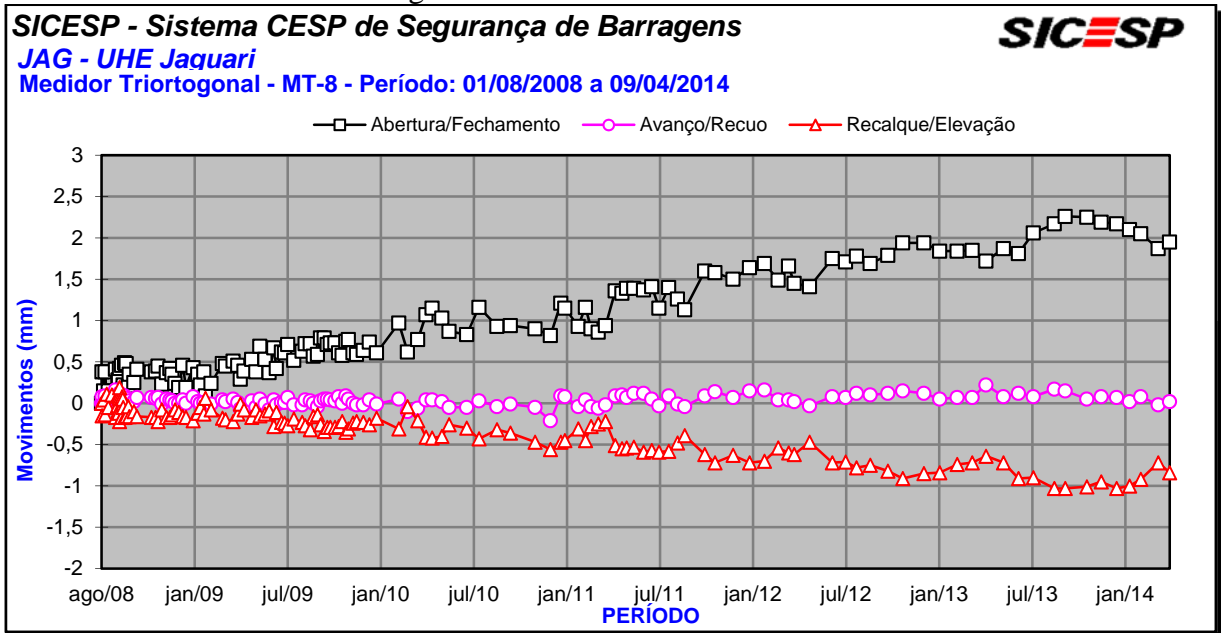
Figura 46- Deslocamentos do MT7.



Fonte: CESP (2014).

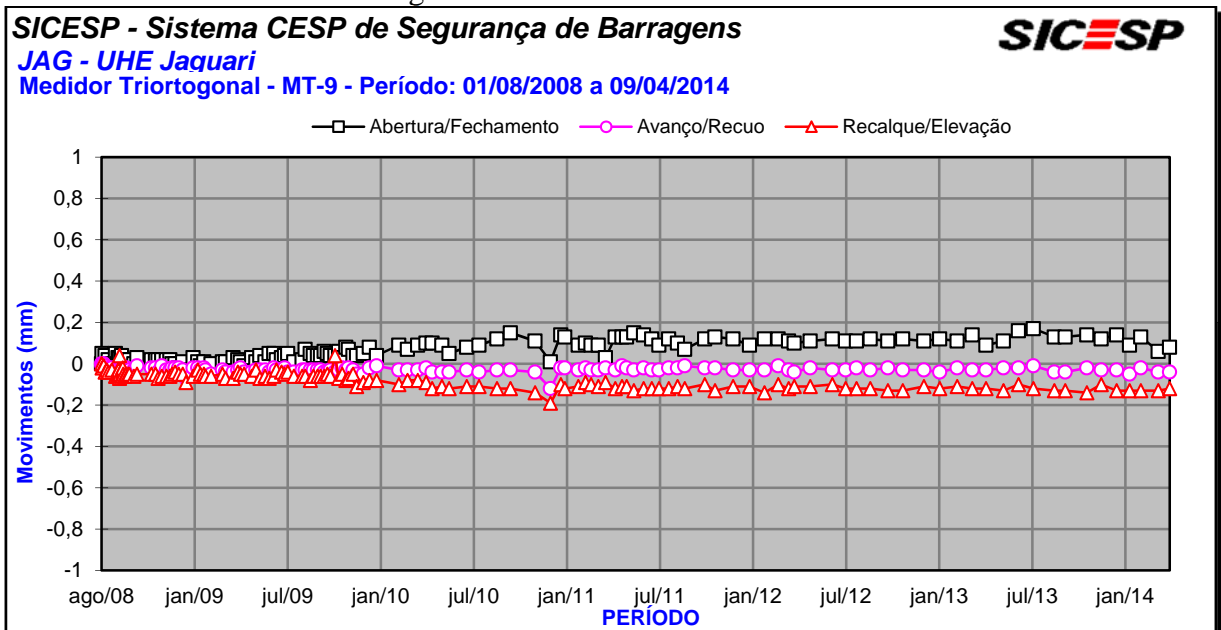
Os MTs de 8 a 14 foram instalados em agosto de 2008, durante a pesquisa de Zoilo (2010). Os deslocamentos são mostrados da Figura 47 à Figura 52. Nota-se que o MT8 e o MT14 apresentam os maiores deslocamentos.

Figura 47- Deslocamentos do MT8.



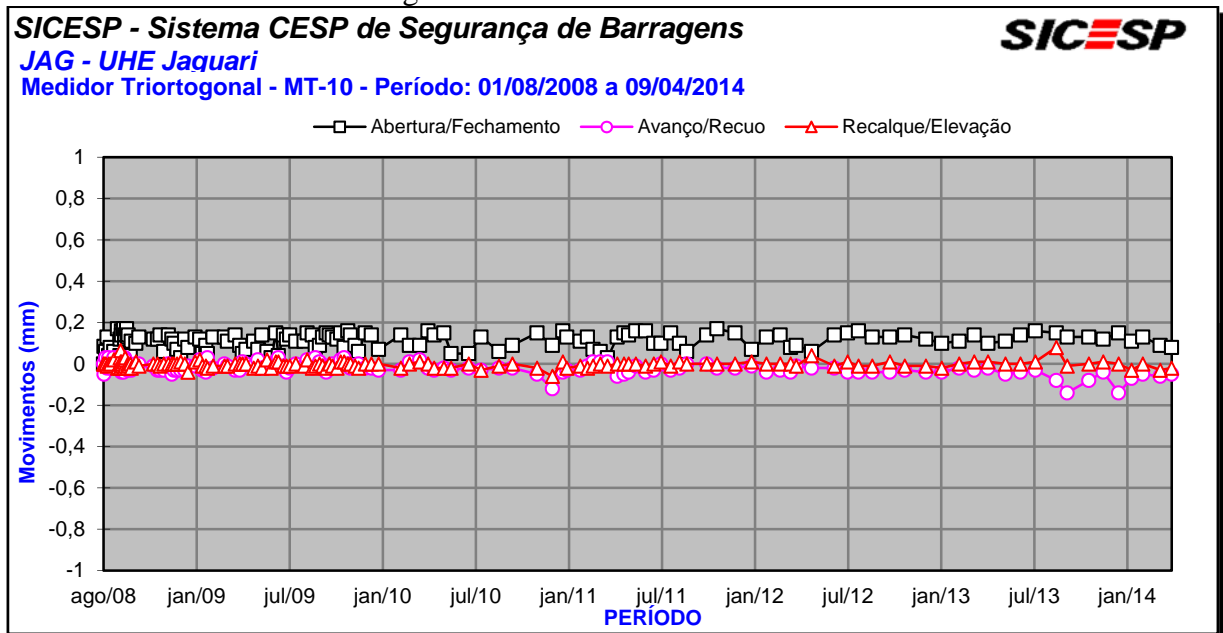
Fonte: CESP (2014).

Figura 48- Deslocamentos do MT9.



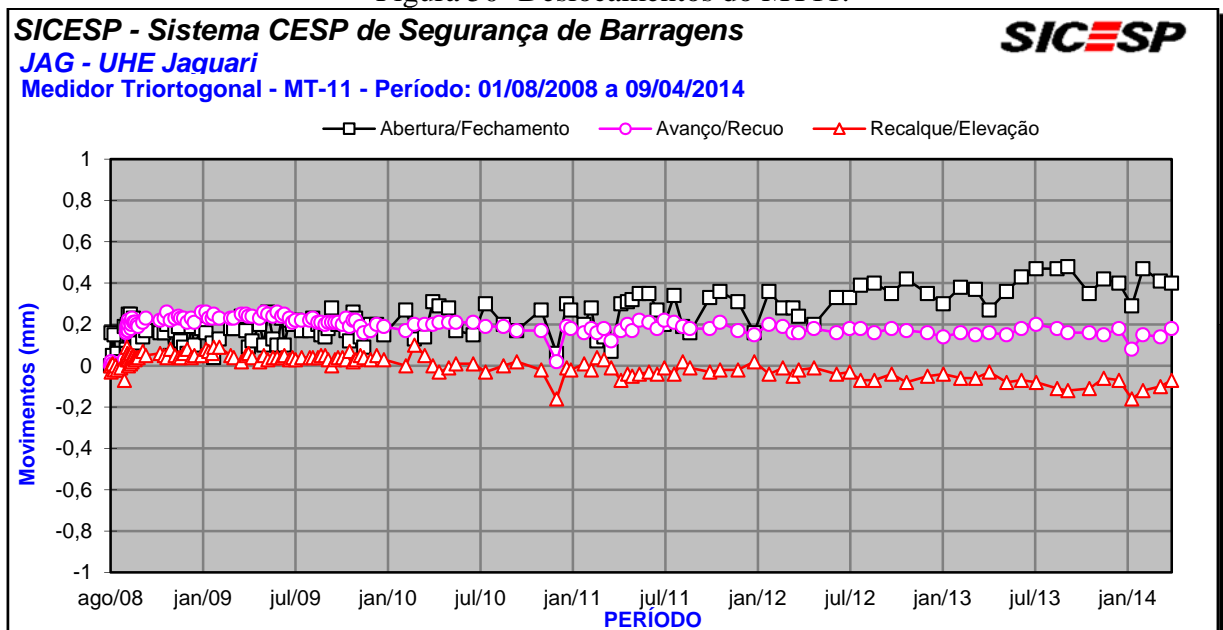
Fonte: CESP (2014).

Figura 49- Deslocamentos do MT10.



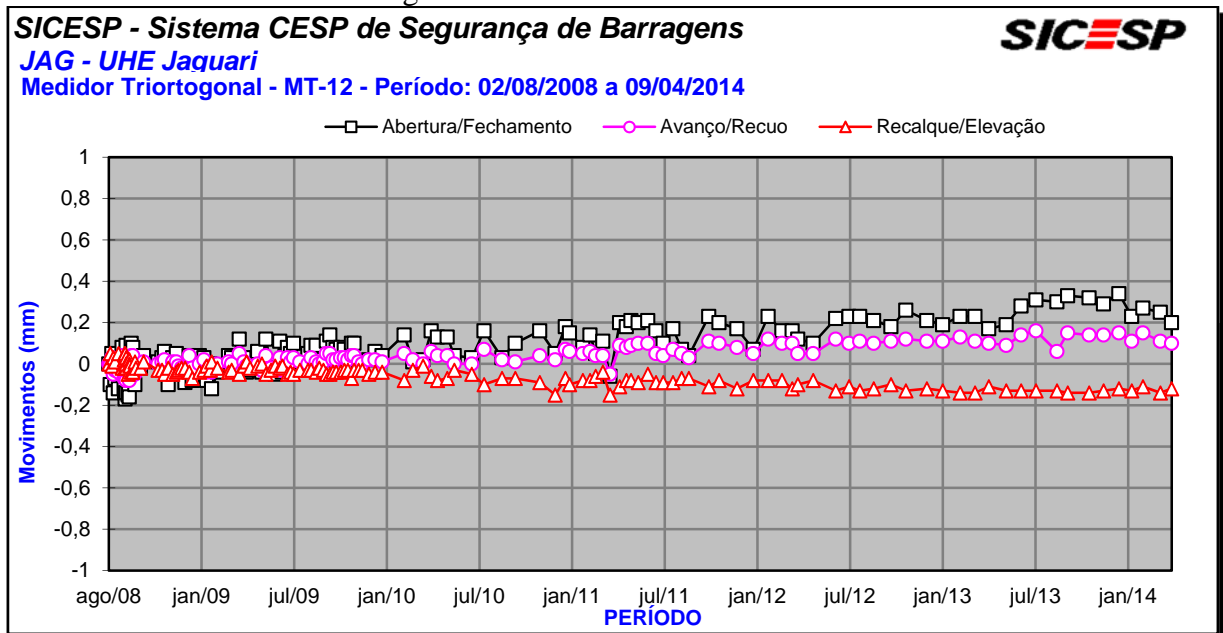
Fonte: CESP (2014).

Figura 50- Deslocamentos do MT11.



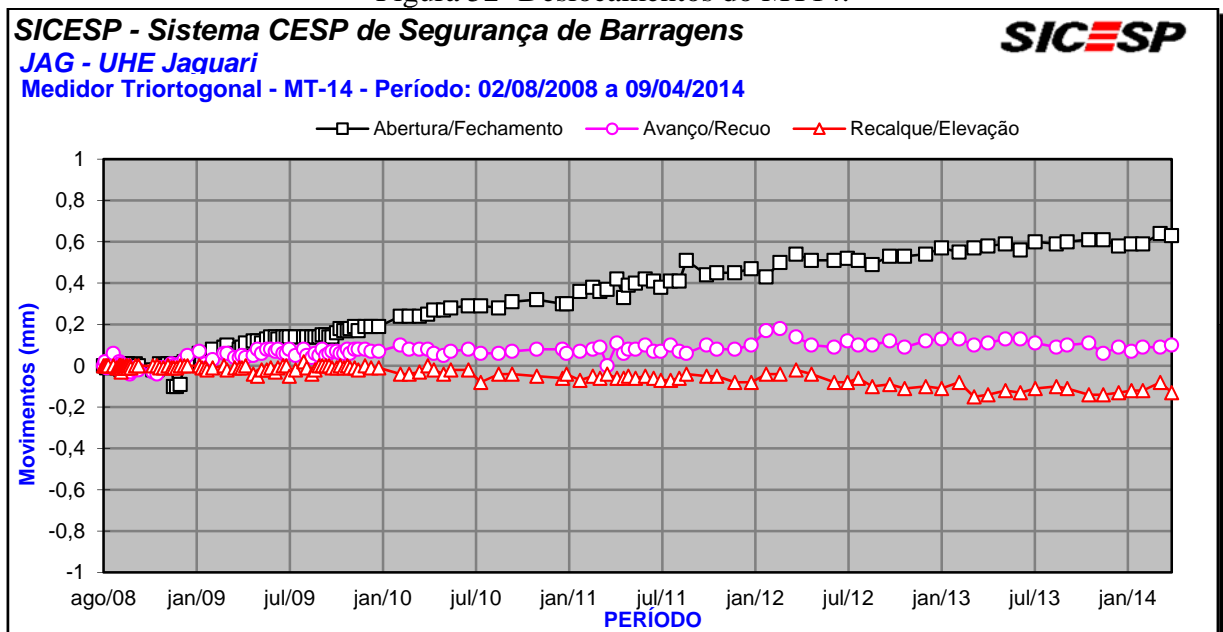
Fonte: CESP (2014).

Figura 51- Deslocamentos do MT12.



Fonte: CESP (2014).

Figura 52- Deslocamentos do MT14.



Fonte: CESP (2014).

A Figura 53 e a Figura 54 mostram os deslocamentos dos MT 15 e 16, no período de setembro de 2009 a abril de 2014.

Figura 53- Deslocamentos do MT15.

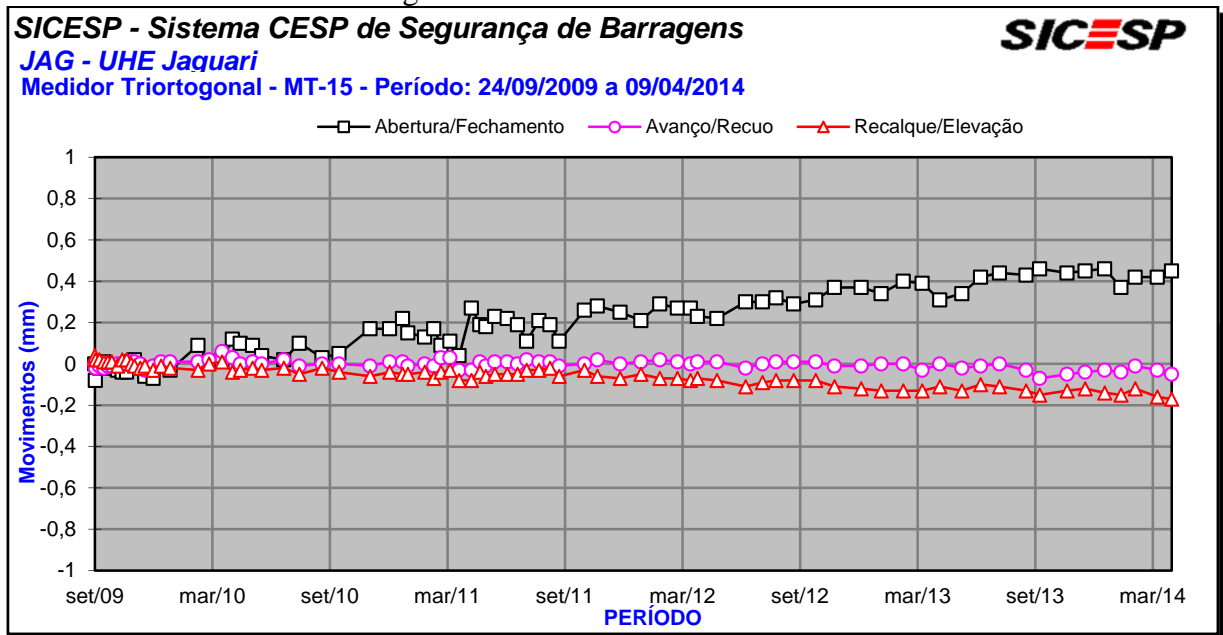
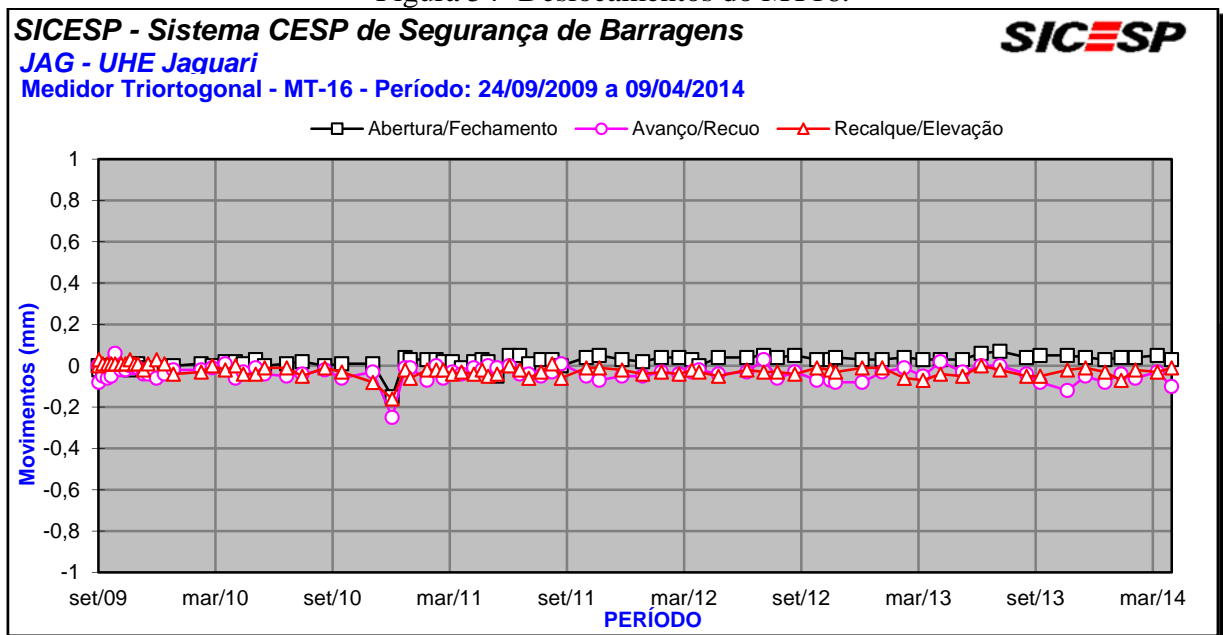
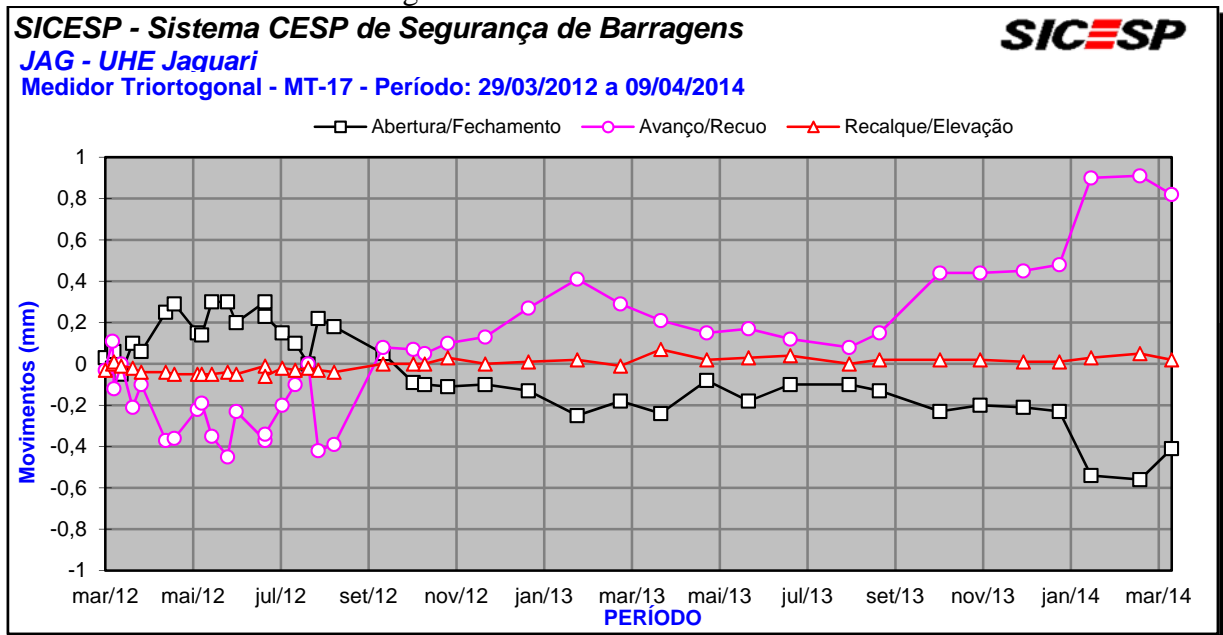


Figura 54- Deslocamentos do MT16.



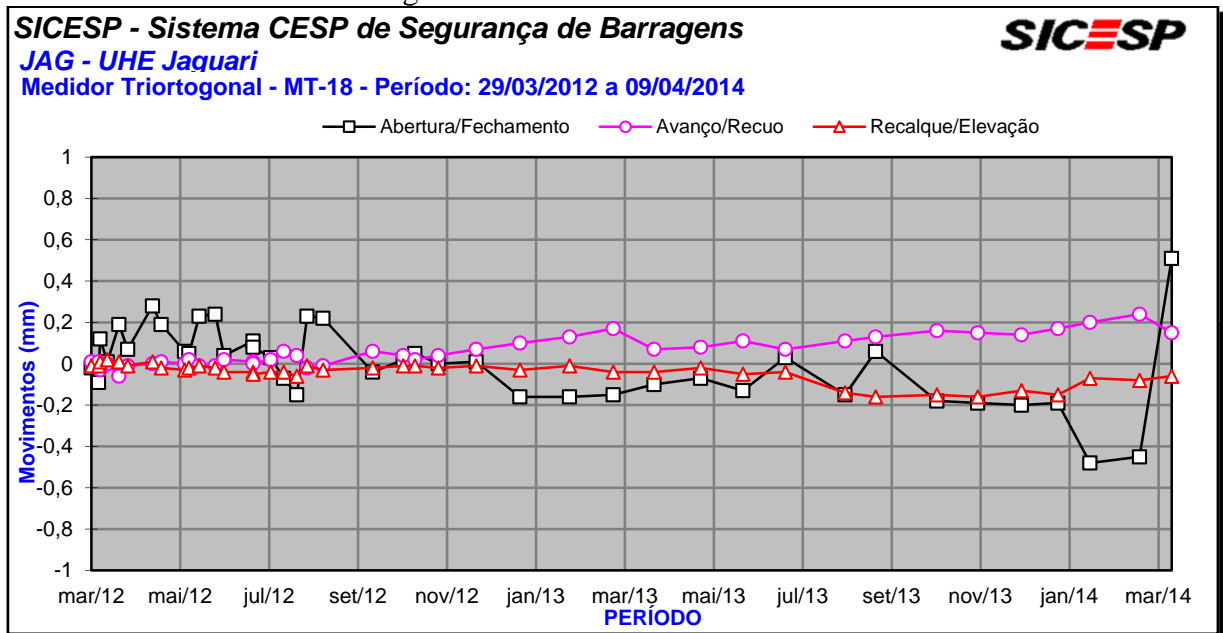
A Figura 55 e a Figura 56 mostram os deslocamentos dos MT 17 e 18, no período de março de 2012 a abril de 2014.

Figura 55- Deslocamentos do MT17.



Fonte: CESP (2014).

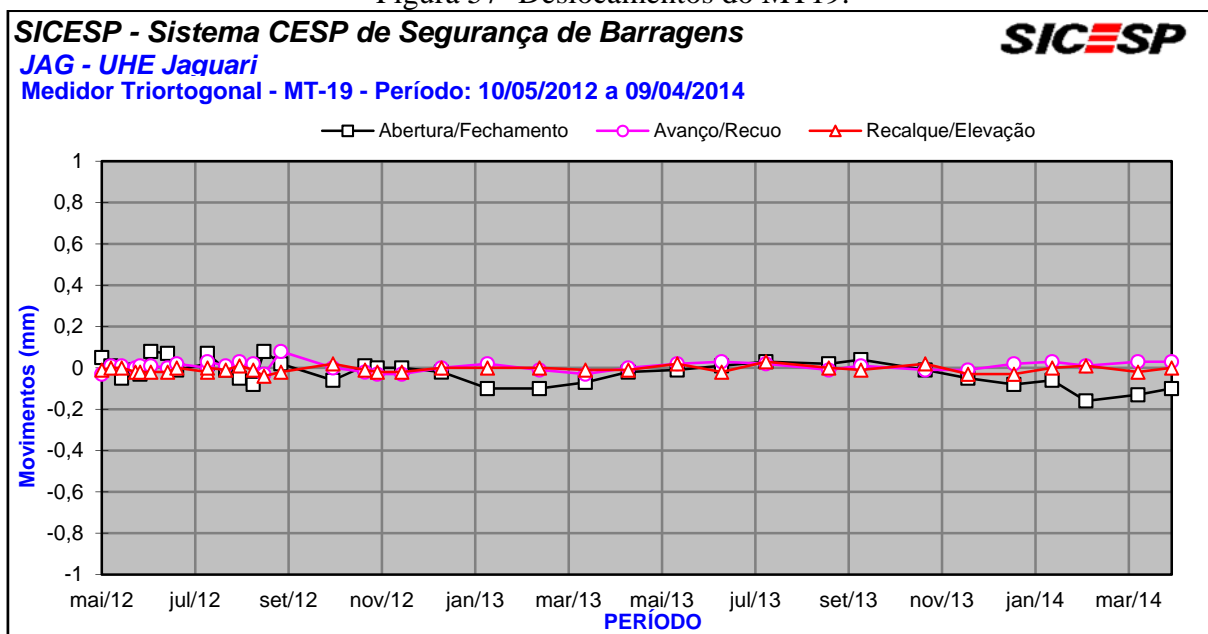
Figura 56- Deslocamentos do MT18.



Fonte: CESP (2014).

A Figura 57 mostra os deslocamentos do MT 19, instalado em maio de 2012.

Figura 57- Deslocamentos do MT19.



Fonte: CESP (2014).

- Extensômetros de hastes múltiplas:

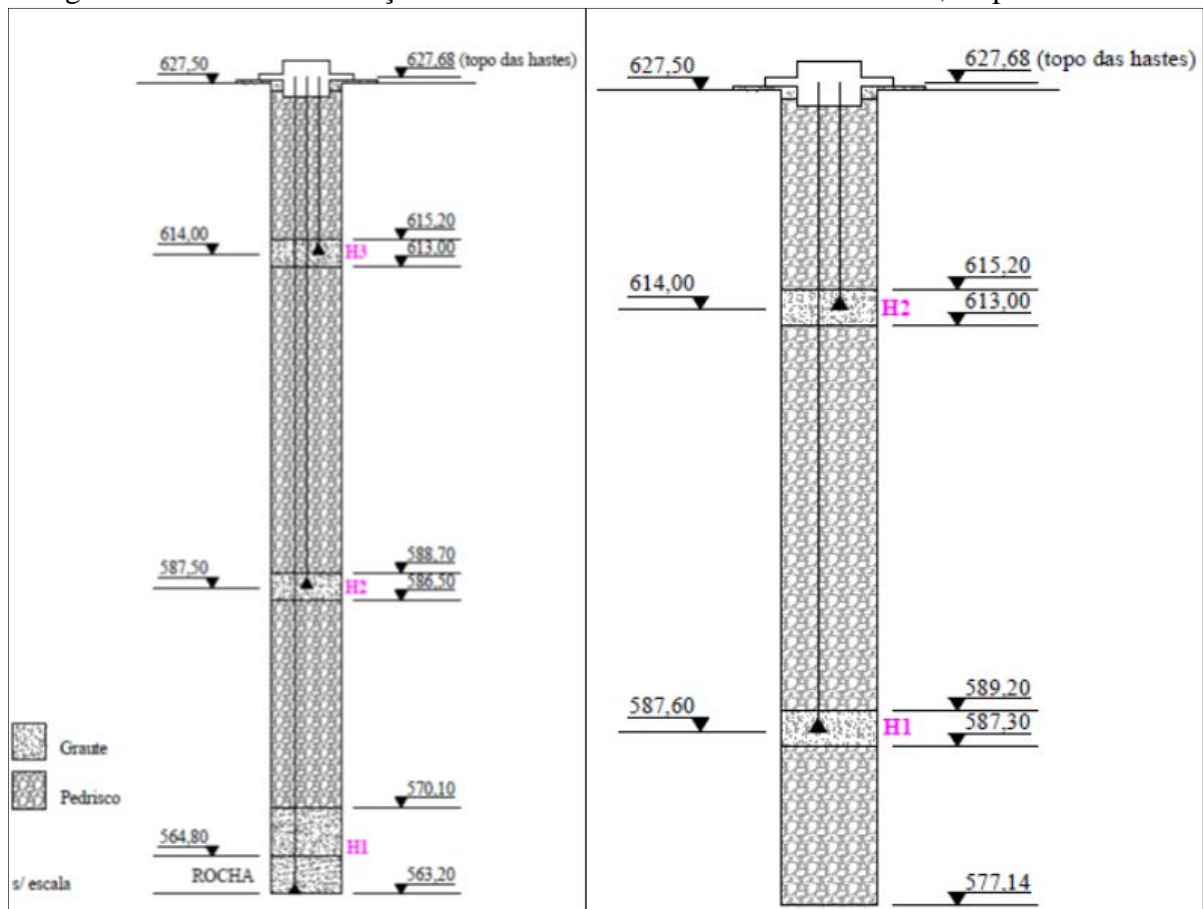
Para monitoramento dos deslocamentos verticais da estrutura foram instalados extensômetros de hastes múltiplas, que já apresentaram sucesso no monitoramento de barragens afetadas pela RAA (Peti, Moxotó, Paulo Afonso I, II, III, IV e outras).

A instalação dos extensômetros foi feita próxima ao pilar P3 da TA ao longo de dois furos de sondagem. O primeiro furo, com 4 polegadas de diâmetro, atravessou todo o concreto da estrutura, chegando a penetrar na rocha de fundação. Ao todo, o furo tem 64,3 m de comprimento. Um segundo extensômetro foi instalado também em outro furo (de 6 polegadas) que originalmente foi concebido para a instalação de um pêndulo invertido. O furo, porém, perdeu a verticalidade, encontrando uma armadura longitudinal do concreto e por isso foi aproveitado para a instalação do segundo extensômetro.

O extensômetro número um é composto por três hastes: A primeira haste (H1) está fixada na rocha de fundação cujo valor da cota é 563,20 metros, a segunda haste (H2) está na cota de 587,5m onde a estrutura está em parte apoiada sobre o maciço rochoso e a haste H3 está na cota 614,0 m que corresponde à variação do nível d'água do reservatório.

O extensômetro nº 2, instalado no furo de 6 polegadas, possui duas hastes nas cotas 614 e 587,5m. As cotas e o perfil de instalação dos extensômetros são mostrados na Figura 58. Além dos extensômetros, Zoilo (2010) indica a instalação de um pêndulo invertido para monitoramento da verticalidade da estrutura, que ainda não foi instalado.

Figura 58- Perfil de instalação das hastes dos extensômetros n°1 e n° 2, respectivamente.



Fonte: Zoilo (2010).

Figura 59- Local de instalação dos extensômetros de hastes múltiplas.



Fonte: Zoilo (2010).

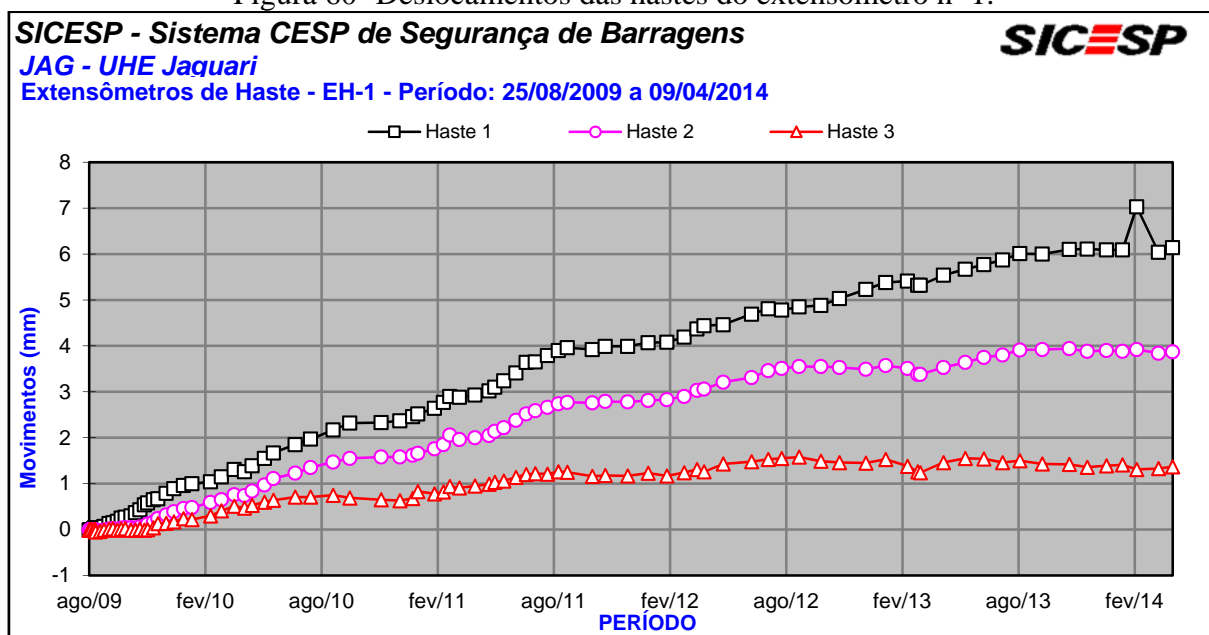
A Figura 59 indica os locais onde foram instalados os extensômetros de hastes múltiplas, denominados EH-1 e EH-2, próximos ao pilar P3 da laje da TA.

As leituras a partir dos extensômetros indicam que a estrutura apresenta elevação, constatando alteamento da crista da barragem, provavelmente ligada à expansão causada pela RAA. Ainda no trabalho de Zoilo (2010) foram mostrados os primeiros resultados do sistemas de monitoramento a partir dos quais foi estimado uma taxa de expansão vertical de 30×10^{-6} ao ano, baseado em apenas sete meses de acompanhamento.

Para tanto, a pesquisadora extrapolou linearmente os 1,2mm de alongamento da haste H1 no extensômetro nº 1 em setes meses para o valor de 2mm em doze meses. Dividindo-se o alongamento obtido pelo comprimento total da haste (64 metros), obteve-se esta taxa de expansão.

A Figura 60 mostra os deslocamentos das hastes do extensômetro nº 1 no período de 25 de agosto de 2009 a 09 de abril de 2014. Observando os deslocamentos da haste H1 é constatado que no primeiro ano de monitoramento o alongamento realmente foi de 2mm, confirmando a taxa de expansão obtida por Zoilo.

Figura 60- Deslocamentos das hastes do extensômetro nº 1.



Fonte: CESP (2014).

Analisando os anos seguintes temos que de agosto de 2010 a agosto de 2011, a haste H1 deslocou 2 mm, mantendo a taxa de expansão vertical de 30×10^{-6} . De agosto de 2011 a agosto de 2012 o deslocamento foi de apenas 1 mm, fato que que repetiu no ano seguinte. Este deslocamento representa uma taxa expansão de 16×10^{-6} .

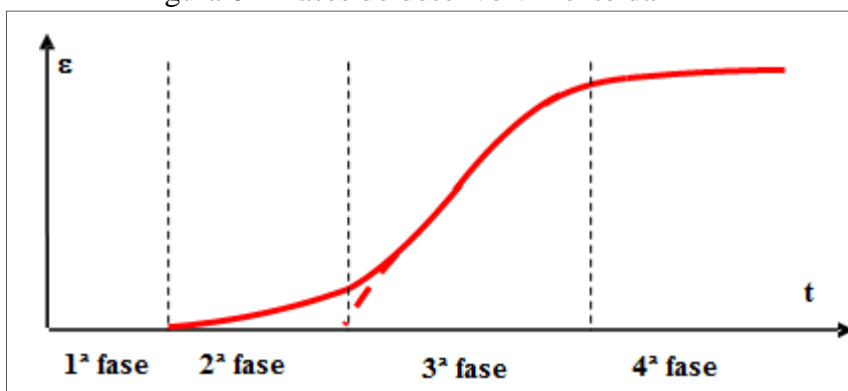
Para o último trecho, a partir do quarto ano de monitoramento, percebe-se que o deslocamento tende a ser menor ainda. O mesmo tipo de comportamento também é observado nas hastes dois e três do mesmo extensômetro.

Segundo Rodrigues (2002, p.11) o processo expansivo decorrente da RAA pode ser dividido em quatro fases, descritas a seguir.

A primeira fase corresponde ao preenchimento dos vazios pelo gel expansivo, portanto, ainda não há expansão do concreto. Na segunda, após o preenchimento dos vazios, o concreto começa a expandir em uma taxa constante e pequena. Na terceira fase a expansão aumenta subitamente e na quarta fase a expansão diminui até se anular, devido ao término dos componentes químicos necessários para o surgimento do gel expansivo.

As fases são mostradas na Figura 61. A linha tracejada indica os casos onde as fases um e dois ocorrem em um curto tempo.

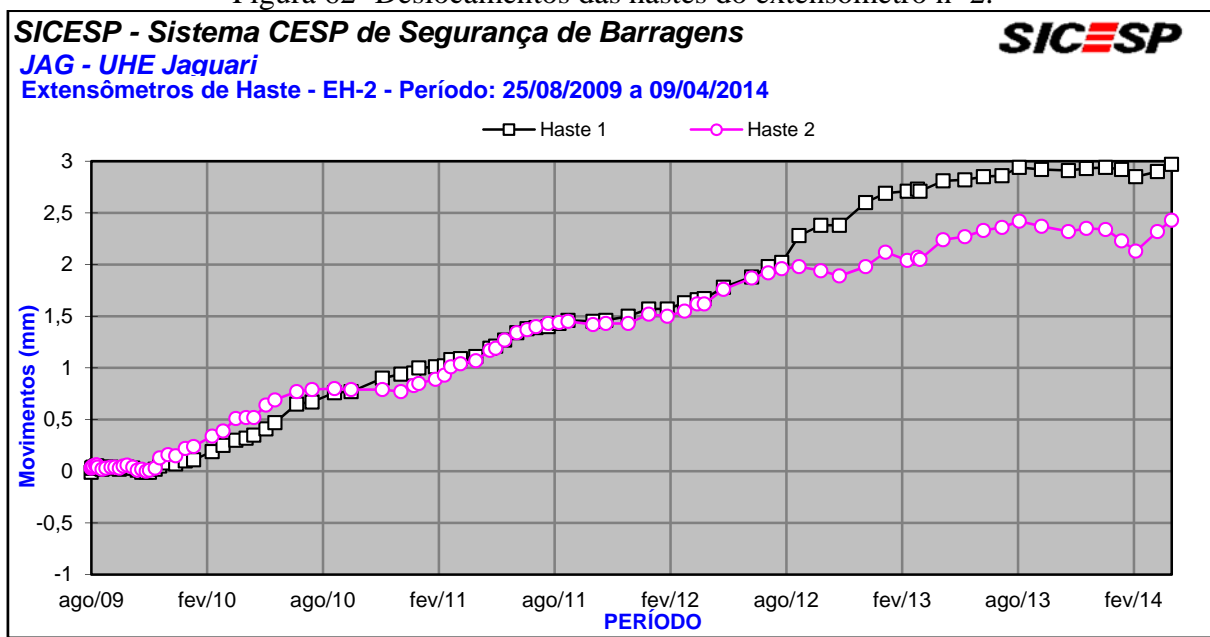
Figura 61- Fases do desenvolvimento da RAA



Fonte: Rodrigues (2002)

Os deslocamentos das hastes do extensômetro nº 2 (EH-2) são mostrados na Figura 62. E o comportamento observado também é semelhante ao extensômetro anterior, mostrando que a estrutura não está mais em franca expansão e assumindo um comportamento de expansão residual próximo ao descrito como quarta fase do desenvolvimento da RAA no trabalho de Rodrigues (2002) e que está representado na figura anterior.

Figura 62- Deslocamentos das hastes do extensômetro n° 2.



- Técnicas geodésicas:

A elevação da estrutura também pode ser monitorada através de técnicas geodésicas, que consiste em comparar as coordenadas de um mesmo ponto com a referência, verificando o deslocamento entre eles. Os deslocamentos horizontais podem ser feitos através de levantamentos planimétricos e os verticais, através de levantamentos altimétricos (ZOILO, 2012).

O método consiste na comparação entre pontos fixos sobre a estrutura a ser monitorada e um ponto localizado em terra, fora da área de influência da barragem. O deslocamento entre os pontos pode ser aferido através de diversas técnicas como triangulação geodésica, nivelamento geométrico, poligonação e determinação de coordenadas por GPS. Este tipo de monitoramento é tradicional em barragens, e também foi aplicado no monitoramento da TA da UHE Jaguari.

A Figura 63 indica a localização do marco superficial sobre a laje da TA e a Figura 64 mostra o marco de referência sobre a rocha, já fora da barragem, considerado indeslocável e a partir do qual são feitos os nivelamentos geométricos.

Os resultados do monitoramento no período de 23 de setembro de 2008 a 18 de março de 2010 são mostrados ainda no trabalho de Zoilo (2010, p. 142-143) e indicam elevação da estrutura da TA neste período. Para períodos posteriores deve-se consultar o responsável pela manutenção civil e segurança de barragens da CESP.

Figura 63- Marco superficial e baliza localizada na laje da TA.



Fonte: Zoilo (2010).

Figura 64- Marco de referência indeslocável sobre a rocha.



Fonte: Zoilo (2010).

- Deslocamentos entre os muros guias:

Para monitorar os deslocamentos das guias metálicas localizadas nos muros na parte frontal da TA foram utilizados dois instrumentos de medida de distância. O primeiro utiliza um medidor de distância do tipo Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER) e o segundo faz uma adaptação do equipamento: Linear Variable Differential Transformer (LVDT).

Os muros são mostrados na Figura 65. A distância entre eles é de 6,3m e, devido às expansões da estrutura, é conveniente que essa distância seja monitorada para evitar um possível travamento das vigas e grades que passam pelas guias metálicas instaladas no muro.

Figura 65- Localização dos muros guia na TA.



Fonte: Zoilo (2010).

O medidor de deslocamentos LASER foi instalado na parte frontal da estrutura, isto é, a parte de frente para o reservatório, com o auxílio de um aparato para fixação. Este aparato é composto por uma barra de aço invar fixado em um dos muros guia, cujo material foi escolhido por apresentar pouca dilatação térmica. A barra de aço invar está sobre uma viga metálica e em uma extremidade é engastada no muro e a outra extremidade fica apoiada próxima ao outro muro, conforme mostrado na Figura 66.

Figura 66- Cantoneira guia para apoio da extremidade livre e a viga metálica posicionada.



Fonte: Zoilo (2010).

O medidor LASER é fixado próximo à extremidade apoiada da barra, dentro dos limites de operação do aparelho. Apesar da pouca dilatação, o aparato é equipado com três sensores de temperatura para correção da variação do comprimento da barra de aço.

A instalação do LVDT foi semelhante ao do LASER e foi posicionado na parte interior da TA, conforme mostrado na Figura 67.

Figura 67- Instalação do aparato com LVDT.



Fonte: Zoilo (2010).

Para os dois aparatos de medição, foram automatizados os programas de leitura, que são realizadas cinco vezes por dia: 0h00, 6h00, 12h00, 15h00 e às 18h00, com o intuito de, além de observar a expansão criada pela RAA ao longo do tempo, verificar também as expansões devido ao aumento da temperatura diária e sazonalmente.

Durante o trabalho de Zoilo (2010) foi observada a aproximação entre o dispositivo de leitura e a parede, que pode ser atribuído também ao fato de as temperaturas médias diárias estarem aumentando no período de acompanhamento.

Por isso, é proposta a divulgação destes dados assim que possível em trabalhos futuros, afim de comprovar a aproximação entre os muros guias, ressaltando que o posicionamento adequado entre os mesmos é de extrema importância no bom funcionamento da Usina.

3.3 Análise e considerações

Como já citado anteriormente, além dos equipamentos já instalados para monitoramento da UHE Jaguari, pode-se ainda implementar um sistema que monitore a distância entre as guias metálicas que conduzem a viga ensecadeira e as grades de proteção, percorrendo toda sua extensão.

Mas a grande dificuldade deste monitoramento está no fato de que dos seus 64 metros de comprimento total, a maior parte (cerca de 60 metros) fica submersa e na parte mais próxima ao fundo do reservatório a água é turva, agitada e com fluxo, o que contribui para dificultar ainda mais o deslocamento e medições. Por isso, recomenda-se avaliar a possibilidade de instalação de um sistema que monitore a abertura entre as guias metálicas ao longo de seus 64 metros de extensão.

Também existe a indicação do monitoramento da umidade interna do concreto no pilares e na laje da TA, porém, com ressalvas diante do que será exposto no programa experimental e também no item 5.3 deste trabalho.

Com relação aos dados que foram atualizados até abril de 2014 percebe-se que a taxa de expansão vertical anual da estrutura tem diminuído, podendo-se supor que a mesma já passou da fase de franca expansão. Recomenda-se maior período de acompanhamento para validar essa suposição.

Além dos dados provenientes dos medidores tri-ortogonais e extensômetros de hastes múltiplas mostrados neste trabalho, indica-se a divulgação dos dados dos outros equipamentos que compõem o sistema de monitoramento como das bases de abertura de fissuras e o monitoramento da distância entre os muros guias feitos com medidores de distância LASER e LVDT e, também, a divulgação dos levantamentos geodésicos realizados no últimos anos. Uma inspeção à estrutura da TA da Usina também é recomendada.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO

4.1 Abrangência e etapas

Pesquisas recentes indicam o interesse no monitoramento da umidade interna do concreto no intuito de avaliar a eficiência de produtos que possam diminuir a umidade no interior do concreto, visto que a presença da umidade é o grande diferencial para ocorrer a RAA após já ter sido utilizado o concreto com materiais reativos.

Por isso, além dos equipamentos já instalados na Usina Jaguari que permitem acompanhar a expansão causada pela RAA, tem-se também o intuito de instalar um sistema que monitore a umidade relativa interna do concreto nos pilares do pórtico de carga da TA, a fim de comparar o desempenho do tratamento superficial escolhido no programa experimental deste trabalho.

Para mensurar a umidade relativa interna do concreto, tem sido estudados métodos indiretos como aplicação de ondas eletromagnéticas (SBARTAĬ, 2006) e métodos diretos com o uso de sensores de umidade da ordem de milímetros, que podem ser fixados internamente no concreto durante sua execução (LANGE et al., 2004) ou inseridos em fase posterior (GRASLEY; 2003).

Acompanhando a tendência das pesquisas mundiais, este projeto buscou pesquisar e avaliar sensores de umidade e de temperatura para serem utilizados no monitoramento de estruturas de concreto.

Depois de determinar o melhor sistema para aquisição destes parâmetros, foi conduzido um experimento para avaliar a umidade interna do concreto mediante a aplicação de produtos impermeabilizantes preferencialmente à base de silanos ou siloxanos, visto que os produtos com esses componentes tem se destacado nas pesquisas mundiais (ESKRIDGE et al. 2009; SILVA, 2009; RESENDEZ, 2011) e são menos dispendiosos do que os tratamentos superficiais à base de lítio, cuja eficácia já tem sido comprovada em laboratório.

Após avaliar o produto impermeabilizante com melhor desempenho com relação à umidade, foi conduzido um segundo experimento visando avaliar a efetividade do produto na prevenção de expansões causadas pela RAA. Os procedimentos serão descritos nos itens a seguir.

4.2 Medidas por sensores embutidos no concreto

Sensores de umidade e de temperatura internos no concreto podem ser inseridos ainda durante a concretagem de uma peça (Figura 68) ou posterior ao endurecimento do concreto, como é o caso deste projeto, onde já se tem a estrutura de concreto da UHE Jaguari necessitando desse tipo de monitoramento. Neste caso, os sensores são embutidos no concreto através de pequenos orifícios.

Figura 68- Sensor instalado junto à armadura antes da concretagem.



Fonte: Lange et al. (2004).

Através desses orifícios, a umidade e a temperatura podem ser aferidas de duas maneiras: através de pequenos sensores ou por sondas (sensores do tipo bastão). Porém, independente do tipo de sensor utilizado é importante ressaltar que o que está sendo monitorado são a temperatura e a **umidade relativa do ar contido no orifício** do concreto e não estes parâmetros correspondentes ao estado do concreto em si.

Os sensores utilizados para aferir estes parâmetros são disponíveis comercialmente e o do tipo bastão já vem pronto para uso. Já o emprego dos sensores menores envolve a montagem de um sistema de aquisição, para então serem utilizados.

O sensor tipo bastão é indicado, e tem seu uso consagrado, para medir umidade e temperatura em concreto e também em madeira. O modelo do tipo sonda utilizado no projeto tem as seguintes características, de acordo com o fabricante:

- Temperatura de operação: -40 °C a 99 °C
- Umidade relativa de operação: 0 % a 100 %
- Tempo de resposta: 8 segundos.
- Precisão dos dados de umidade: 1,8 % para ambientes entre 10 % e 90 % e 3 % para umidade acima de 90 %.

Foi proposto que neste projeto fosse utilizado o sensor tipo bastão, porém, de acordo com Grasley (2003) esse tipo de sensor apresenta algumas limitações no uso para a medição da umidade no interior do concreto, citadas a seguir:

- para umidades elevadas, o tempo de estabilização no interior do concreto pode chegar a 24 horas;
- recomenda-se que as sondas não devem ser retiradas da cavidade entre uma medição e outra;
- não deve existir diferença de temperatura entre o ar contido na cavidade por onde entra a sonda e a temperatura do concreto, pois a diferença de apenas 1°C pode gerar um erro de aproximadamente 6% na umidade relativa.

Ao se adquirir o produto foi verificado que o próprio fabricante indica que a sonda deve permanecer pelo menos 30 minutos dentro do orifício (tempo de equilíbrio) antes de se fazer a leitura, o que impossibilitou o uso deste sensor no projeto devido ao elevado número de medidas que eram necessárias. Além disso, o equipamento apresentou alto custo para aquisição, o que impossibilitou dispor de maior número de unidades.

Assim, para dar continuidade ao projeto, optou-se pela utilização de pequenos sensores capacitivos. Para tanto, foram escolhidos três sensores de fabricantes distintos: o SHT 11 da Sensirion, o DHT 22 da MaxDetect e o IButton 1923 da Maxim.

As características de operação dos sensores são apresentadas na Tabela 7 e a Figura 69 mostra o tamanho e conformação dos sensores.

Tabela 7- Características dos sensores

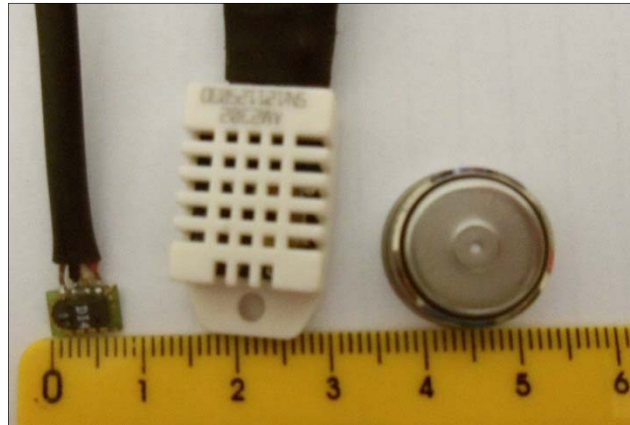
Características	Unidade	SHT 11	DHT 22	IButton 1923
Temperatura de operação	°C	-40 a 123,8	-40 a 125	-20 a 85
Precisão	°C	0,5 (a 25°C)	0,5	0,5
Umidade de operação	%	0 a 100	0 a 100	0 a 100
Precisão	%	3,5	2 a 5	5 *

* variável com uso de software de correção.

Fonte: Próprio autor.

As vantagens do uso destes sensores são o menor custo de aquisição e menor tempo de equilíbrio para aquisição dos dados, quando comparados com o sensor do tipo bastão. Porém, a desvantagem é que alguns dos sensores não são fornecidos prontos para uso, sendo necessário o desenvolvimento de microcontroladores ligados aos sensores.

Figura 69- Sensores utilizados no projeto.

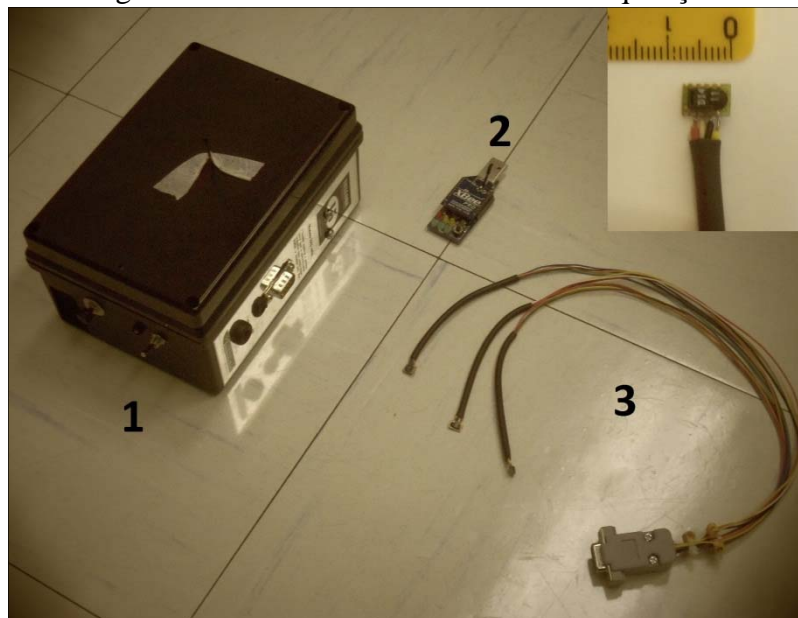


Fonte: Próprio autor.

Para eleger, dentre os três sensores, qual é o mais aplicável ao projeto, foram comparadas características como durabilidade, aquisição, eficiência e facilidade de operação para, enfim, definir qual deles apresentava a melhor relação entre custo e benefício.

O sensor SHT 11 é o menor entre os três. Porém, é o único dentre eles que fornece dados em padrão analógico. O desenvolvimento para seu sistema de aquisição teve que envolver uma curva de calibração para converter o dado analógico em digital.

Figura 70- Sensor SHT 11 e sistema de aquisição.



Fonte: Próprio autor.

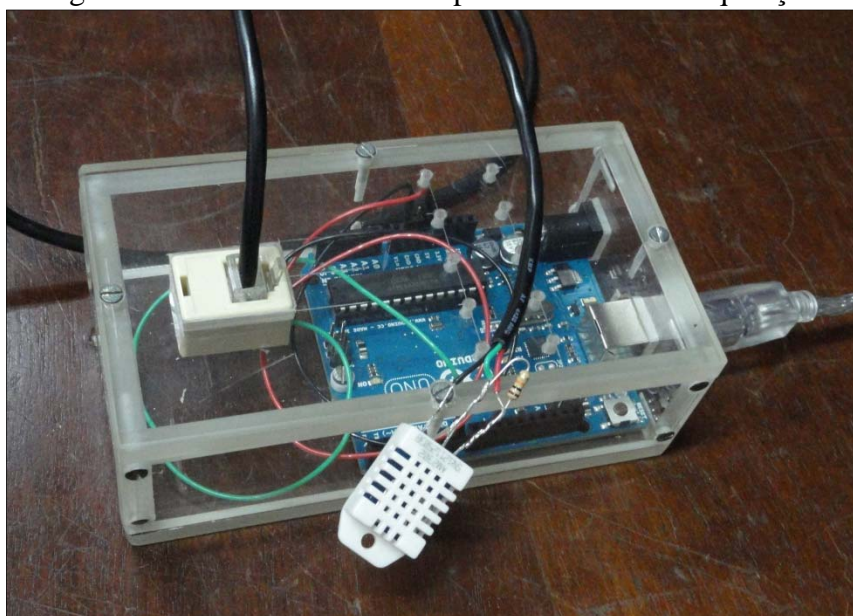
O sistema desenvolvido é mostrado na Figura 70 onde em 1 é mostrado o dispositivo de aquisição que contém o microcontrolador que recebe o sinal analógico e converte-o em dado digital. O item 2 é o receptor de sinal que é conectado ao computador para receber o

dado sem o uso de fios. O cabo mostrado no item 3 é composto por três sensores que eram inseridos no concreto e ligados ao dispositivo número 1. No detalhe é mostrado o tamanho do sensor, com aproximadamente 8 mm em sua maior dimensão. A montagem do sistema de aquisição de dados foi conduzida pelo Prof. Alexandre C. R da Silva.

O uso do sensor SHT 11 mostrou a vantagem de não ser necessário manusear os corpos de prova, poupando o esforço de retirá-los dos ambientes de exposição como câmara úmida ou estufa. Mas sua utilização foi inviável devido à baixa durabilidade dos sensores, que paravam de funcionar de maneira repentina e sem motivo aparente. Com relação ao custo, comparado com os outros dois sensores, este apresentou o valor intermediário (R\$ 70,00 cada unidade – adquirimos em outubro de 2012).

O sensor DHT 22 fornece dados de maneira digital, ou seja, valores de umidade e temperatura “prontos” (sem ser necessário realizar calibrações), mas para isso foi necessário desenvolver um aparato de aquisição a partir de uma placa de desenvolvimento. O sensor e o sistema de aquisição são mostrados na Figura 71. O desenvolvimento do aparato para aquisição dos dados, bem como o software para leitura dos dados foi desenvolvido pelo Prof. Flávio H. Sato.

Figura 71- Sensor DHT 22 e respectivo sistema de aquisição.



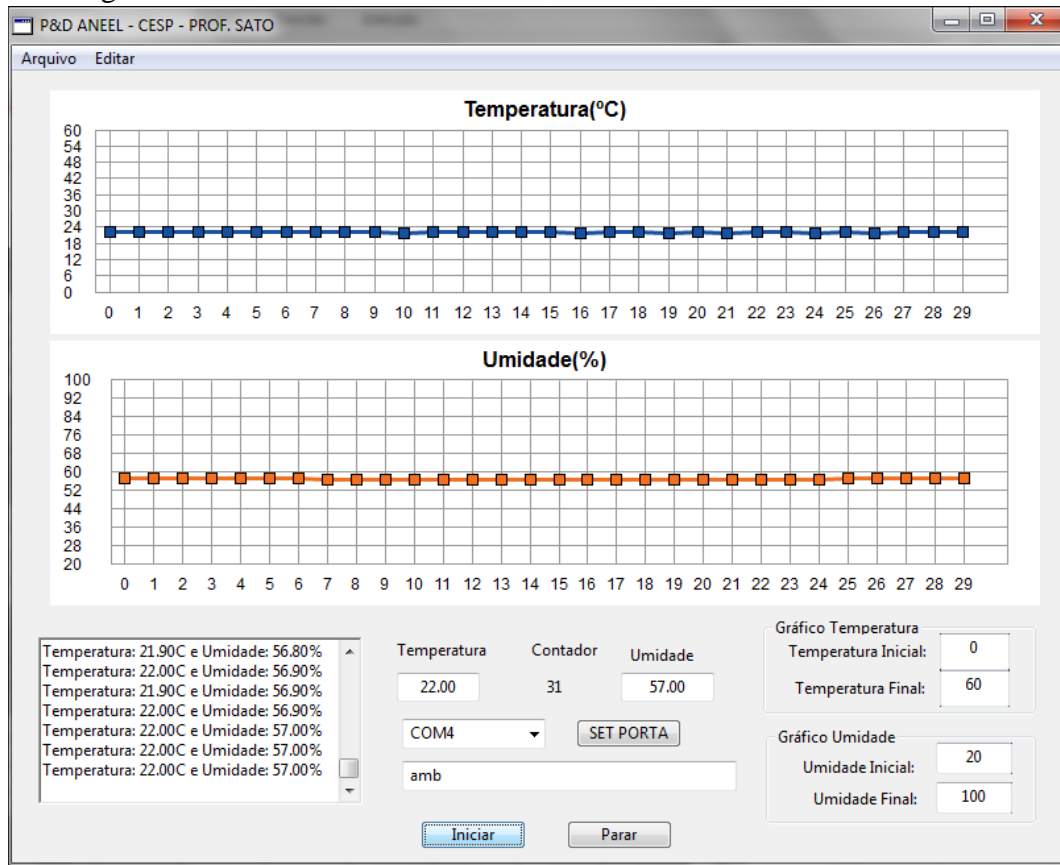
Fonte: Próprio autor.

Para aquisição dos dados, o sistema era conectado diretamente ao computador e os dados podiam ser visualizados em tempo real através do software desenvolvido para o projeto. Através do software era possível observar os valores fornecidos e ainda, ter a

visualização dos mesmos através de gráficos. O intervalo de amostragem para cada par de dados (temperatura e umidade) era de dois segundos, que é tempo mínimo de resposta do sensor. A Figura 72 mostra a interface do software durante a utilização do sensor.

Com relação ao custo, este foi o sensor que apresentou menor custo: cada sensor DHT 22 custou R\$ 20,00 (aquisição em março de 2013).

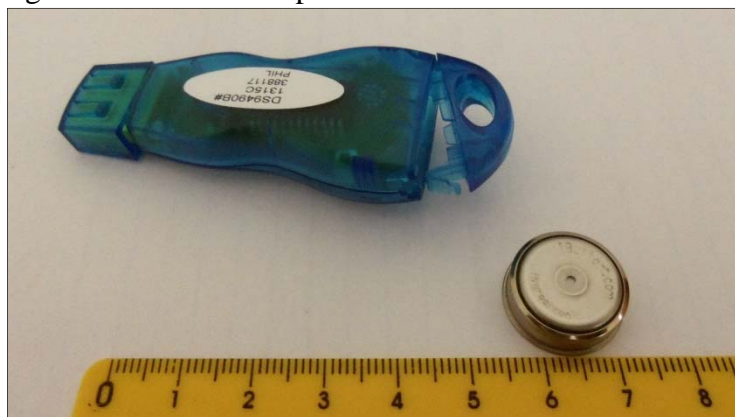
Figura 72- Interface do software de leitura dos dados do sensor DHT 22.



Fonte: Próprio autor.

O sensor IButton 1923 também fornece os dados de maneira digital e para utilizá-lo é preciso adquirir um dispositivo de leitura junto ao fabricante que permite a interação entre o sensor e o computador mediante o uso de um software específico disponibilizado pelo fabricante. O sensor e o dispositivo de leitura são mostrados na Figura 73 e sua utilização envolve os procedimentos descritos a seguir.

Figura 73- Sensor e dispositivo de leitura do IButton 1923.



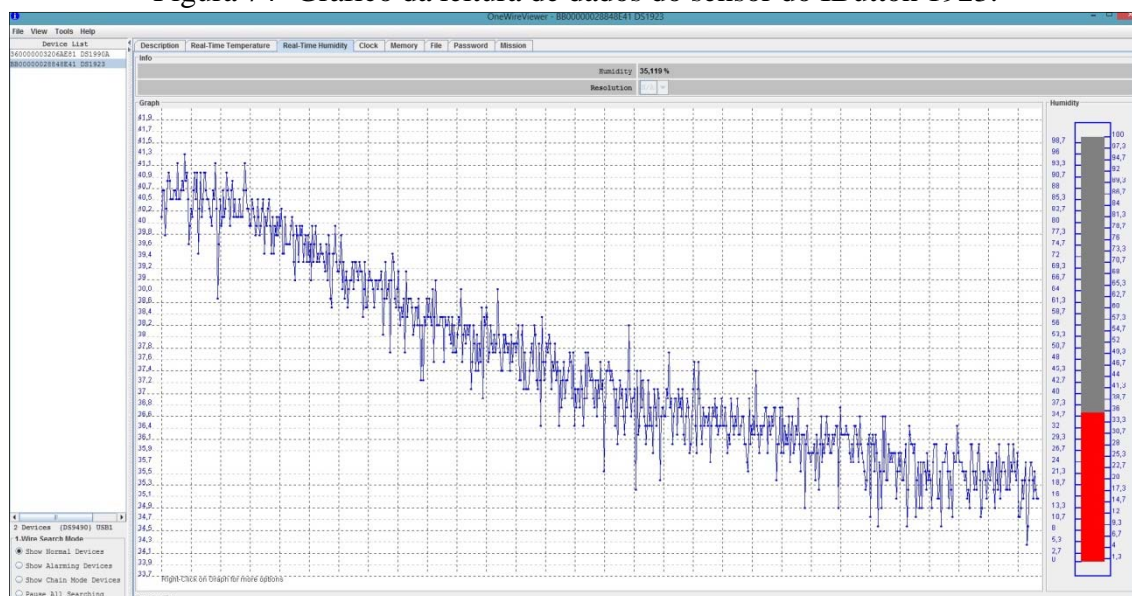
Fonte: Próprio autor.

O sensor é inserido no leitor e conectado ao computador e, a partir deste momento, o sensor começa a adquirir os dados, cujo intervalo entre as medidas pode ser modificado, respeitando o intervalo mínimo de um segundo entre as medidas. Depois disso, o sensor pode ser retirado do leitor e inserido no orifício aberto no concreto, pois o sensor possui uma fonte de alimentação interna. Ao final do período de leitura, o sensor deve ser retirado do concreto e os dados são descarregados no computador utilizando-se novamente o dispositivo de leitura.

As desvantagens observadas com o uso deste sensor foram que os dados não podem ser avaliados em tempo real, haveria dificuldade para manuseio do sensor no momento de inseri-lo e também ao retirá-lo do orifício feito no concreto. Avaliou-se a possibilidade de ligar o sensor diretamente a um equipamento de leitura, o que também facilitaria o manuseio do sensor na introdução aos orifícios, mas a temperatura que seria utilizada para soldar os componentes certamente danificaria o sensor.

Fora essas dificuldades práticas, foi observado que os dados obtidos apresentaram padrão com ruídos, conforme é mostrado na Figura 74. Além dessas desvantagens técnicas, têm-se o custo deste sensor, que é o maior entre os três adquiridos (R\$ 400,00 a unidade, adquiridos em março de 2013).

Figura 74- Gráfico da leitura de dados do sensor do IButton 1923.



Fonte: Próprio autor.

Visando resumir a avaliação dos três tipos de sensores avaliados, a Tabela 8 mostra a comparação feita entre os sensores a partir das características como dimensão do sensor, custo, tipo de dado fornecido, durabilidade do sensor, sistema de aquisição bem como a qualidade dos dados obtidos.

Tabela 8- Comparação das características dos sensores.

Característica	SHT 11	DHT 22	IButton 1923
Dimensões	menor dimensão	maior dimensão	dimensão intermediária, mas difícil manuseio para inserir no orifício
Custo	R\$ 70,00	R\$ 20,00	R\$ 400,00
Tipo de dado	analógico	digital	digital
Durabilidade	não durável	durável	não avaliada, mas depende da bateria interna
Sistema de aquisição de dados	necessita curva de calibração e prévio processamento	necessita desenvolvimento de sistema de aquisição (porém simples)	necessita aquisição do dispositivo de leitura, pronto para uso
Qualidade dos dados	boa	boa	apresenta ruídos

Diante do exposto neste item, pode-se constatar que o sensor que apresenta melhor relação entre o custo e o benefício gerado é o sensor DHT 22. Portanto, nas leituras de umidade e temperatura conduzidas na parte experimental deste trabalho foram utilizados sensores do fabricante citado.

Como o sensor do tipo bastão já havia sido adquirido, devido ao seu uso consagrado em medidas de umidade do concreto, o mesmo foi utilizado apenas para comparar os valores obtidos pelo sensor do DHT 22, visto que para adquirir apenas uma medida era necessário esperar até 60 minutos com o sensor inserido no concreto.

4.3 Determinação dos protótipos de concreto para os ensaios

Depois de determinar o tipo de sensor adequado para o projeto, restava determinar o traço do concreto e as dimensões dos corpos de prova (CPs), para proceder ao ensaio que avaliava a eficiência dos sistemas de impermeabilização. Para tanto, sugeriu-se o uso de um concreto com permeabilidade elevada e corpos de prova com dimensões que permitissem investigar mais de uma profundidade simultaneamente para que se pudesse verificar a entrada da umidade no concreto.

Por isso, foram utilizados corpos de prova na forma de prismas, com seção quadrada de 250 x 250 e comprimento de 400 (dimensões em milímetros). O concreto utilizado apresentava permeabilidade de aproximadamente $K=10^{-6}$ cm/s, justamente para facilitar a entrada de umidade no interior do concreto. Para a execução do concreto foi utilizado um traço já executado pelo LCEC em trabalhos anteriores, cuja permeabilidade era próxima ao especificado. O traço é apresentado na Tabela 9.

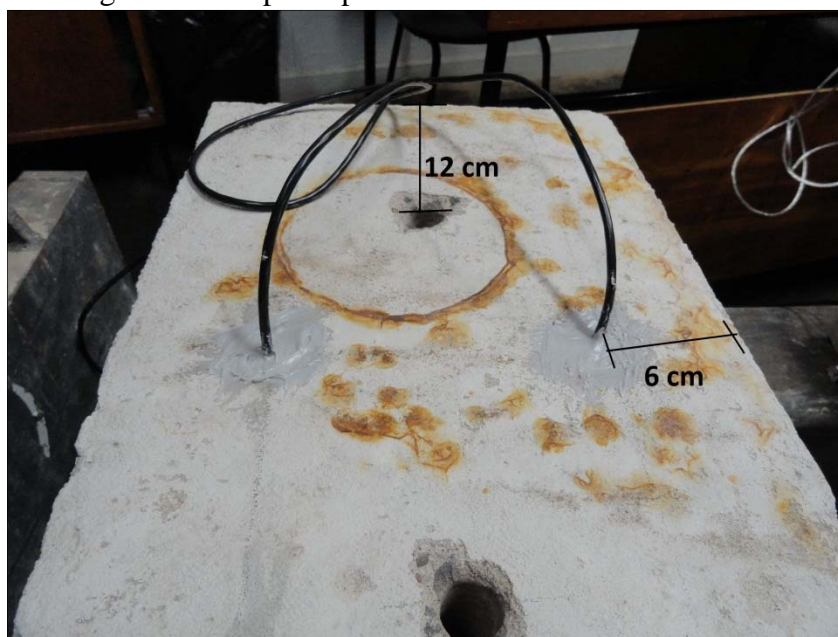
Tabela 9- Concreto utilizado no ensaio preliminar.

Material	Peso por m ³ (kg)
Cimento CP II E 40	250
Areia	828
Brita 1	1237
Água	173
Aditivo Plastificante	1,25

Fonte: LCEC (2013).

Para a inserção dos sensores foram feitos quatro orifícios com diâmetro de 22 milímetros, sendo dois deles com 60 milímetros de profundidade e os outros dois, com 120 milímetros. A disposição dos orifícios é mostrada na Figura 75, onde a profundidade de cada orifício equivale a distância entre o orifício e a borda do corpo de prova.

Figura 75- Corpo de prova com dois sensores inseridos.



Fonte: Próprio autor.

Para garantir que a umidade lida correspondesse à situação real do ar no interior do concreto, os orifícios foram vedados com um produto à base de silicone. Entre o sensor e o silicone, foi disposta uma barreira, conforme é mostrado na Figura 76, com o intuito de não permitir que o silicone danificasse os componentes internos do sensor.

A umidade medida no interior dos orifícios foi de 99,9%, portanto, os corpos de prova foram encaminhados para ambiente externo onde havia bastante incidência solar. Após duas semanas não foram observadas reduções significantes no teor de umidade. Então os corpos de prova foram colocados em uma estufa e mantidos na temperatura de 50°C também pelo período de duas semanas, durante as quais a umidade dos corpos de prova foi monitorada em várias ocasiões.

Ao final do período verificou-se que a umidade nos orifícios com 60 mm de profundidade era em torno de 75% enquanto que no furo de maior profundidade, a umidade permanecia acima dos 90%.

A partir do observado foi decidido que a profundidade a ser investigada seria apenas a de 60 mm, pois com valores maiores seria muito demorado para se obter qualquer variação na umidade no interior do concreto. Com isso, foi reduzido no número de orifícios por corpo de prova, sendo necessário apenas dois em cada CP. Assim, as dimensões dos corpos de prova puderam ser reduzidas, visando facilitar o manuseio dos mesmos. As dimensões dos corpos de prova passaram a ser 125 x 125 x 250 (dimensões em milímetros).

Figura 76- Inserção e selamento do sensor no orifício.



Fonte: Próprio autor.

Outra característica que também foi modificada para os novos corpos de prova foi o traço do concreto, buscando-se maior permeabilidade, também com o objetivo de facilitar a entrada e saída de umidade do interior do concreto. Adotou-se então um novo traço (também executado recentemente no LCEC) com permeabilidade conhecida próxima de $K=10^{-4}$ cm/s. O novo traço é mostrado na Tabela 10, onde se pode observar o menor consumo de cimento para consumo de água equivalente.

Tabela 10- Traço do concreto utilizado (ensaio definitivo).

Material	Peso por m³ (kg)
Cimento CP II E 40	200
Areia	686
Brita 1	1396
Água	174
Aditivo Plastificante	1,00

Fonte: LCEC (2013).

4.4 Sistemas para impermeabilização do concreto: eficiência e compostos

Resultado de ampla consulta entre fabricantes/fornecedores de produtos impermeabilizantes no mercado brasileiro, foram apresentados para emprego na pesquisa,

uma série de produtos. Desses, foram escolhidos 14 produtos preferencialmente à base de silanos/siloxanos, visto que esses componentes conferem ao impermeabilizante características e desempenho promissores, para emprego sobre superfície do concreto, favorecendo a mitigação dos efeitos expansivos da RAA.

O experimento consistiu em comparar a eficiência desses 14 diferentes produtos para impermeabilização do concreto. Dentre os produtos fornecidos para o projeto, encontram-se alguns à base de solventes e outros à base de água, conforme pode ser observado na Tabela 11.

Os produtos são de natureza hidrofugante, ou seja, devem permitir a saída do vapor d'água e impedir a entrada de água no interior do material. Assim, a eficiência dos produtos foi testada medindo-se os valores de umidade no interior dos corpos de prova.

Para isso, foram moldados 31 corpos de prova com o traço e as dimensões conforme definido na seção anterior, a saber: dimensões de 125 x 125 x 250 (em milímetros) e permeabilidade do concreto de aproximadamente $K=10^{-4}$ cm/s. Cada corpo de prova foi moldado com dois orifícios (A e B) de 22 milímetros de diâmetro e profundidade igual a 60 milímetros em cada CP. A Figura 77 mostra um corpo de prova já moldado com os orifícios a partir do posicionamento de tubos de PVC inseridos ainda durante a moldagem.

Figura 77- Corpo de prova moldado com orifícios.



Fonte: Próprio autor.

Depois do período de cura em câmara úmida, os corpos de prova foram colocados em estufa e mantidos na temperatura de 60°C. A umidade relativa do ar no interior dos orifícios

dos CPs foi monitorada, procurando alcançar a umidade estabelecida, inferior a 78%, em todos os CPs. O valor foi atingido depois de dezesseis dias de permanência na estufa.

Assim, com a umidade relativa inicial abaixo de 80% em todos os CPs tinha-se um intervalo satisfatório antes da saturação podendo ser verificada a eficiência dos impermeabilizantes quando os CPs fossem encaminhados para um ambiente úmido.

É importante citar que a umidade verificada nos corpos de prova foi bastante variável e isto provavelmente se deve ao fato de que a circulação de ar dentro da estufa é limitada, secando mais os corpos que estavam próximos à fonte de calor. A Figura 78 mostra a disposição dos corpos de prova dentro da estufa.

Figura 78- Corpos de prova dentro da estufa.



Fonte: Próprio autor.

Após o período em estufa, os corpos de prova foram encaminhados para uma sala onde a temperatura é mantida constantemente em 23°C e esperou-se até que os mesmos estivessem em equilíbrio com o novo ambiente para então serem impermeabilizados.

A impermeabilização foi feita utilizando-se pincel e com aplicação de duas “demãos”, de acordo com o procedimento recomendado pelos fabricantes, pois em todos os casos a aplicação poderia ser feita com pincel e o número de demãos recomendado era de no mínimo dois em alguns casos e de no máximo duas em outros.

Para cada um dos quatorze produtos teve-se dois corpos de prova impermeabilizados. O intervalo de tempo entre as demãos foi dado de acordo com as recomendações de cada fabricante.

A enumeração dos fabricantes, dos produtos, bem como a composição principal e a base de cada produto pode ser observada na Tabela 11, onde também se tem o intervalo entre demãos recomendado pelo fabricante. Na tabela também constam os números dos corpos de prova em que foi aplicado cada produto. Deste modo, foram 28 corpos de prova impermeabilizados e mais três CPs que foram mantidos sem impermeabilização, sendo eles os de números 29, 30 e 31.

No manuseio dos produtos foi observado seus aspectos aquosos, bem como a sua facilidade em penetrar nos corpos de prova. Após a aplicação dos produtos, os corpos de prova apresentavam apenas um aspecto molhado, sem alteração de cor da superfície. A Figura 79 mostra a aplicação de um dos produtos.

Figura 79- Impermeabilização dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

Durante a aplicação dos impermeabilizantes, os orifícios foram protegidos com espuma. Após a aplicação e secagem dos produtos, os orifícios dos corpos de prova foram selados utilizando-se, além da espuma, uma vedação com massa de calafetar cobrindo a superfície de cada orifício, garantindo-se assim que a umidade não entrasse através do mesmo. O resultado da vedação pode ser observado na Figura 80.

Tabela 11- Características dos produtos impermeabilizantes e CPs aplicados.

Fabricante	Produto	CPs	Composição	Base	Intervalo entre demãos
A	A1	1 e 2	silano-siloxano oligomérico	água	4 a 12 horas
	A2	3 e 4	copolímero de butil acrilato e metil metacrilato	solvente	mínimo 5 horas
B	B3	5 e 6	silano-siloxano oligomérico	água	6 horas
	B4	7 e 8	silano-siloxano oligomérico	solvente	6 horas
C	C5	9 e 10	silano-siloxano oligomérico	água	úmido sobre úmido
	C6	11 e 12	silano-siloxano oligomérico	solvente	úmido sobre úmido
D	D7	13 e 14	monocomponente (99% silano) - Trietoxioctilsilano	livre de solvente	úmido sobre úmido - 5 horas
	D8	15 e 16	Polisiloxanodiol, Trimetoxi(metil)silano, Trietoxioctilsilano, Tetrabutanolato de titânio, Octametilclotetrassiloxano	não informado	úmido sobre úmido
	D9	17 e 18	Nafta de petróleo, Trimetoxi (2,4,4-trimetilpentil) silano	solvente orgânico	úmido sobre úmido
E	E10	19 e 20	siloxano oligomérico	solvente	10 minutos
	E11	21 e 22	silano / siloxano	água	máximo 30 minutos
F	F12	23 e 24	não informado	água	úmido sobre úmido
	F13	25 e 26	silano / siloxano	solvente	6 horas
	F14	27 e 28	silano-siloxano	solvente	6 horas

Fonte: Próprio autor.

Figura 80- Vedação dos orifícios.



Fonte: Próprio autor.

Para testar a eficiência dos produtos em não permitir a entrada de água no interior dos CPs ou permitir a saída de vapor de água, os CPs foram submetidos a ciclos em câmara úmida entremeados por exposição ao ar livre onde eram submetidos a sol intenso. A umidade do ar no interior dos orifícios dos corpos de prova foi monitorada semanalmente, tempo que correspondeu a cada ciclo.

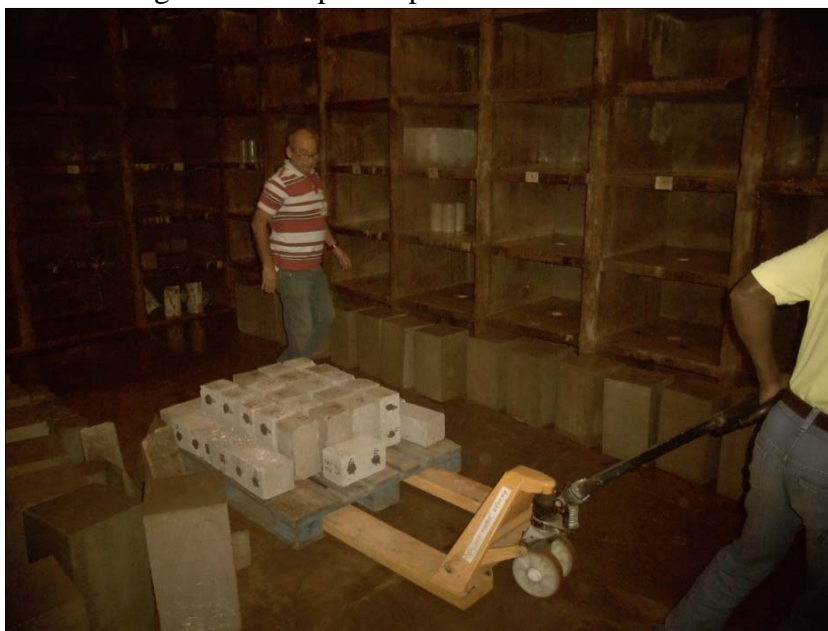
Assim, de acordo com as umidades verificadas foi adotada a seguinte sequência: os dois primeiros ciclos foram em câmara úmida, seguidos de dois ciclos em ambiente externo e finalizando com quatro ciclos em câmara úmida, totalizando oito semanas de ensaio.

Durante os ciclos em ambiente externo os corpos de prova foram expostos ao sol durante o horário de expediente e mantidos em ambiente interno fora deste intervalo a fim de não serem expostos ao aumento de umidade relativa do ar que ocorre durante a noite.

No referido período a temperatura média na cidade foi de 26,3°C com máxima de 33,5°C e a umidade relativa média do ar foi de 52,2%, segundo os dados climáticos da estação de Ilha Solteira monitorada pelo Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da Unesp de Ilha Solteira (<http://clima.feis.unesp.br/>).

Em todos os ciclos os corpos de prova foram dispostos de maneira que os orifícios ficassem nas faces laterais dos CPs, evitando a entrada de água pelas faces superior ou inferior. A disposição dos corpos de prova é mostrada na Figura 81, onde tem-se os mesmos sendo encaminhados para o primeiro ciclo em câmara úmida.

Figura 81- Corpos de prova na câmara úmida.



Fonte: Próprio autor.

Ao final de cada ciclo, adotou-se que os corpos de prova deveriam ser retirados dos ambientes de exposição e colocados na mesma sala onde foi feita a impermeabilização, visando ter sempre a mesma temperatura no ato de leitura das umidades.

Esse procedimento foi adotado porque a umidade relativa do ar é diretamente influenciada pela temperatura, visto que para cada temperatura tem-se determinada quantidade de vapor d'água máxima no ar (100% saturado). Assim, a umidade relativa do ar é dada pela razão entre a quantidade de vapor real do ar verificada e a quantidade máxima de vapor possível do ar nessa temperatura (CHRISTOPHERSON, 2012).

Um exemplo que esclarece a maneira como a umidade relativa do ar varia de acordo com a temperatura pode ser encontrado em Fidélis (2013): o ar contendo 8 g/m^3 de água pode ter diferentes umidades relativas a 10°C e a 20°C , pois na temperatura de 10°C a quantidade máxima de água que o ar pode conter é 9 g/m^3 , resultando em uma umidade relativa igual a 89%. Este mesmo ar contendo 8 g/m^3 , mas na temperatura de 20°C terá a umidade relativa igual a 47% pois a quantidade máxima de água nessa temperatura é de 17 g/m^3 .

Por isso buscou-se ter sempre a mesma temperatura nos corpos de prova, pois este fato foi observado no final do terceiro ciclo, quando os CPs foram retirados do sol, fazendo-se as leituras logo em seguida. Na ocasião foi verificado que a umidade apresentada pelos corpos de prova foi maior do que observado no ciclo anterior, enquanto estavam em câmara úmida.

Aparentemente este fato seria contrário ao explicado anteriormente por Fidelis (2013), mas a umidade elevada na verdade corresponde ao vapor de água saindo dos corpos de prova

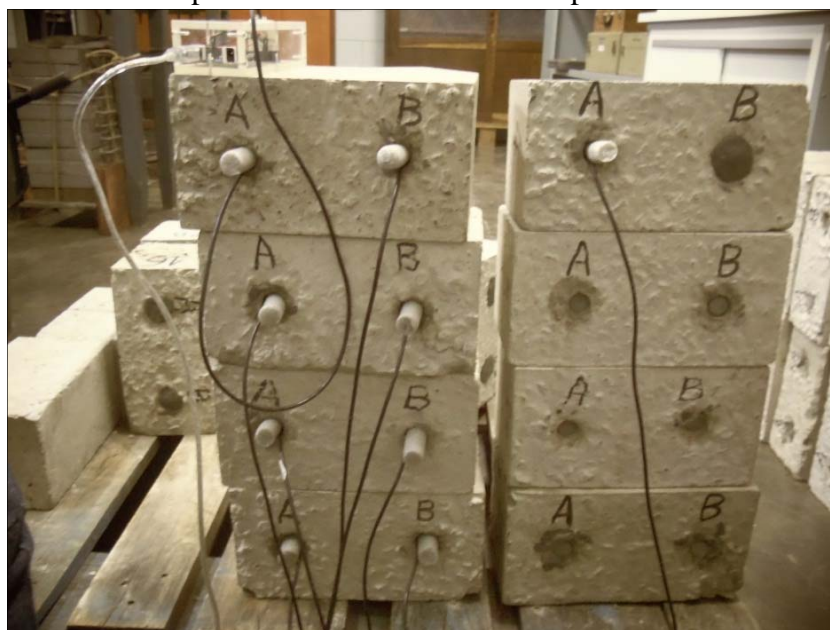
justamente por estarem ainda “quentes”. Esse mesmo fato também era observado ao se retirar os corpos de prova de dentro da estufa, pois enquanto ainda estavam perdendo calor a umidade verificada era sempre 99,9%, indicando que ainda havia água no interior do concreto que continuava saindo em forma de vapor.

Depois de analisadas estas observações, priorizou-se a retirada dos corpos de prova com antecedência, mantendo-os no ambiente climatizado (23°C) por uma noite antes de serem feitas as leituras.

Para recolher os dados de umidade e de temperatura do ar no interior de cada orifício era retirada a vedação e introduzido o sensor, que ficava isolado dentro do orifício recebendo a espuma como barreira. Após alguns minutos, os sensores já estavam em equilíbrio com o ar no interior do concreto e então eram anotados os valores de umidade e temperatura.

Foram utilizados os sensores DHT 22 como já justificado anteriormente. A Figura 82 mostra o procedimento de leitura: os sensores ficavam isolados dentro dos orifícios e a leitura dos dados para cada orifício era feita conectando-se o cabo do sensor no dispositivo de leitura.

Figura 82- Procedimento para leitura de umidade e temperatura no interior do concreto.



Fonte: Próprio autor.

Ao final do experimento, foi possível observar o desempenho dos diversos produtos, podendo avaliar a capacidade em impedir a entrada de água no interior do concreto e também se os produtos permitiam a saída da mesma do interior do corpo de prova, quando o mesmo era exposto ao sol. Ao final dos oito ciclos foi eleito o produto de melhor desempenho para ser utilizado no ensaio posterior, que será descrito no próximo item.

4.5 Impermeabilização do concreto com RAA

O objetivo deste ensaio foi testar a eficiência da impermeabilização na prevenção de expansões devido à reação álcali-agregado. Para isso foram moldados dezesseis prismas de concreto nas dimensões dadas pela NBR 15577-6 (ABNT, 2008), a saber: com seção quadrada de 75 x 75, comprimento de 285 (dimensões em milímetros) e pinos de aço fixados em suas extremidades. Depois de desmoldados, os prismas permaneceram em câmara úmida durante o período de cura.

Foi utilizado um cimento com alto teor de álcalis, conforme prescrito na norma citada, e o agregado graúdo utilizado foram rochas do tipo gnaisse procedentes da região da UHE Jaguari e que foi estudado por Marques (2009), considerado reativo.

Além dos resultados obtidos no estudo de Marques (2009) também puderam ser observadas características macroscópicas no agregado que também evidenciam sua reatividade como a presença de estruturas gnáissicas indicando que a rocha passou por processos de tensionamentos podendo originar quartzos tensionados (mineral classificado como reativo, de acordo com a parte 1 da NBR 15777/2008).

Assim procurou-se produzir um concreto com características expansivas devido à RAA a fim de verificar se a aplicação do produto impermeabilizante é capaz de prevenir ou diminuir os efeitos expansivos. Para isto, foi utilizado o produto de melhor desempenho no ensaio que comparou a umidade interna do concreto mediante a utilização dos quatorze produtos disponíveis. O produto considerado com melhor desempenho foi o A2, do Fabricante A e que foi aplicado em alguns prismas, conforme será descrito adiante.

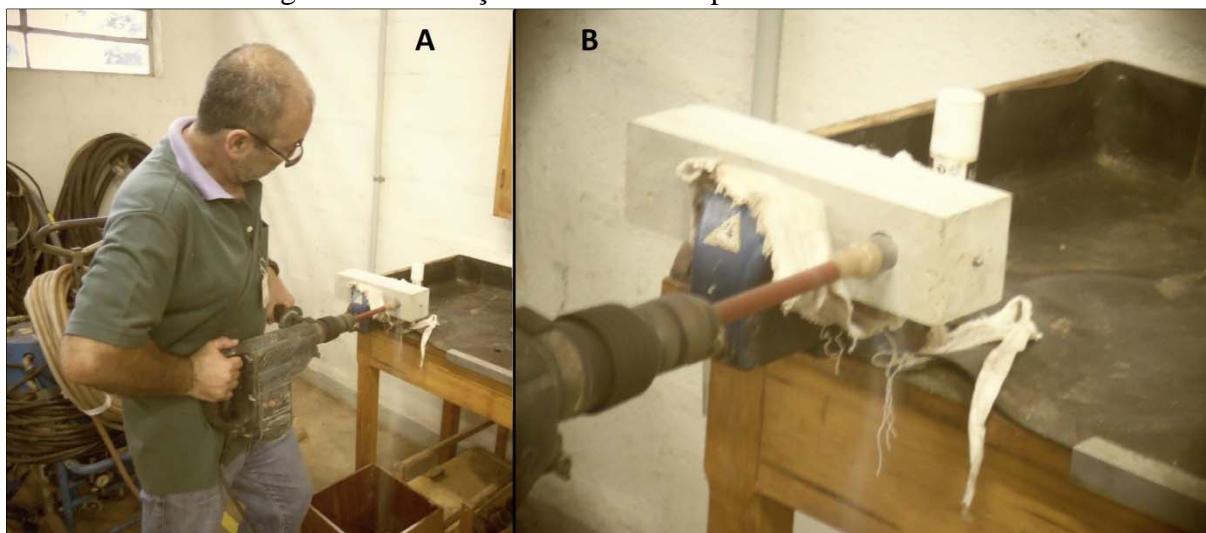
Além de variável aplicação do impermeabilizante, também foram introduzidas diferenças na umidade inicial dos prismas de concreto e no ambiente de ensaio, com presença ou não de lâmina d'água.

Buscando verificar se a variação de umidade inicial no interior do concreto influencia na ocorrência de expansão, foram separados sete prismas e colocados na estufa com temperatura de 60°C. Para verificar a umidade no interior do conjunto de prismas, escolheu-se o prisma de maior peso (que provavelmente seria o mais úmido) que foi utilizado como sacrifício para a tomada da umidade interna.

A umidade foi verificada a partir de orifícios feitos ao longo do eixo longitudinal do prisma, com profundidade de aproximadamente 33 milímetros, correspondente ao centro do prisma, conforme pode ser observado na Figura 83. Para cada vez que a umidade foi

verificada teve-se que fazer um novo orifício porque o sistema de vedação não resistiu à temperatura no interior da estufa.

Figura 83- Execução do orifício no prisma de sacrifício.



Fonte: Próprio autor.

O período em estufa cessou quando a umidade relativa verificada no prisma foi de 37,4% com temperatura de 23,3°C. Este prisma, identificado como prisma de sacrifício, a partir do qual foram medidas as umidades foi descartado, não sendo utilizado posteriormente no ensaio de expansão devido aos orifícios feitos no mesmo. Os seis prismas restantes foram impermeabilizados.

O ensaio de expansão foi conduzido nas câmaras térmicas com temperatura em 60°C, para acelerar os processos de reação que ocorrem entre os componentes da mistura, portanto acima da temperatura proposta pela parte 6 da NBR 15577, que indica para o ensaio de longa duração dos prismas de concreto a temperatura de 38°C, por um ano de verificação. Esta temperatura foi adotada devido aos resultados obtidos por Marques (2009), que nos experimentos nesta temperatura indicaram a potencialidade reativa do material e também por outras pesquisas que estão apresentando resultados promissores para essa temperatura de exposição.

Para a realização do ensaio foram exploradas cinco condições diferentes, sendo três prismas para cada condição. As condições são mostradas na Tabela 12, onde se verifica que dentre os seis prismas previamente secos e impermeabilizados, metade ficou na câmara com presença de água e os outros, na câmara sem lâmina d'água no fundo.

Tabela 12- Condições dos prismas no ensaio de expansão.

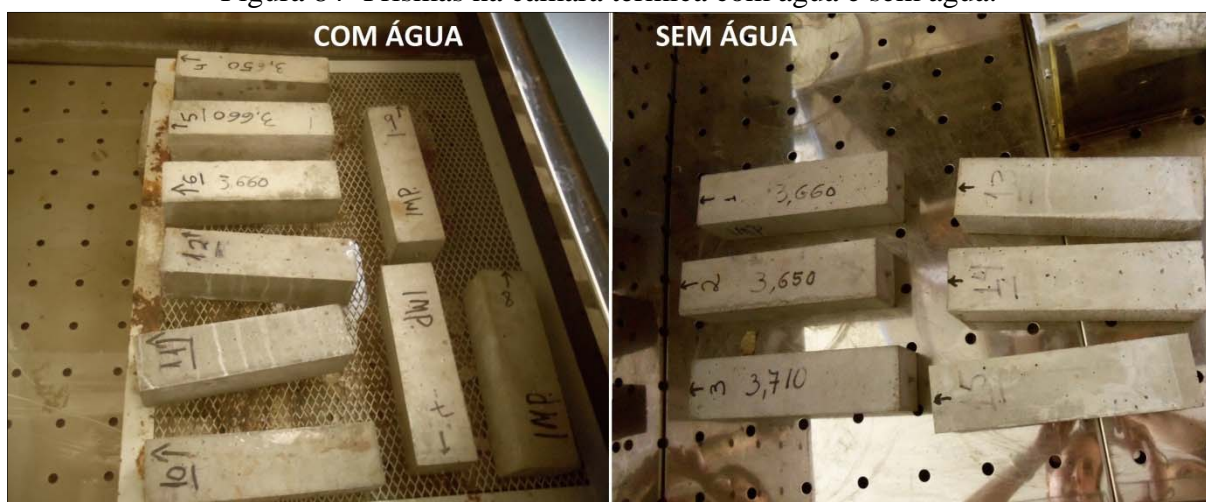
Prisma	Umidade interna	Superfície	Câmara térmica
1	seco	impermeabilizado	sem água
2			
3			
4	seco	impermeabilizado	com água
5			
6			
7	molhado	impermeabilizado	com água
8			
9			
10	molhado	sem tratamento superficial	com água
11			
12			
13	molhado	sem tratamento superficial	sem água
14			
15			

Fonte: Próprio autor.

O restante dos prismas permaneceu em câmara úmida até as vésperas da impermeabilização, dos quais tem-se que três deles foram impermeabilizados colocados na câmara térmica com presença de água, os outros seis permaneceram sem tratamento superficial e foram dispostos com e sem a presença de lâmina d'água na câmara térmica.

A expansão dos prismas foi obtida através de relógio comparador com precisão de milésimos de milímetros, sendo o ensaio conduzido durante o período de 120 dias. As leituras foram feitas aos 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42, 61, 75, 91, 105 e 120 dias. A Figura 84 mostra os prismas na câmara térmica com lâmina d'água e sem a presença de água. A Figura 85 mostra um dos prismas no relógio comparador.

Figura 84- Prismas na câmara térmica com água e sem água.



Fonte: Próprio autor.

Figura 85- Prisma no relógio comparador.



Fonte: Próprio autor.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados tanto os resultados observados nos dois experimentos conduzidos com o uso de produtos impermeabilizantes como também algumas discussões sobre a umidade interna verificada no concreto e comparações entre resultados obtidos por distintos tipos de sensores.

5.1 Eficiência dos impermeabilizantes e a umidade interna do concreto

O experimento para comparar os 14 produtos impermeabilizantes apresentados consistiu em avaliar a umidade do ar dentro de corpos de prova de concreto submetidos a ciclos alternados entre câmara úmida e exposição direta ao sol. Cada ciclo correspondeu a uma semana.

Antes da aplicação dos produtos, a umidade verificada nos corpos de prova era variada, mas com a maior parte dos valores entre 70% e 80% representando assim uma margem satisfatória até a saturação. Após a aplicação dos produtos, esperou-se dois dias para a secagem total e foi feita então a leitura inicial.

Neste ponto, verificou-se que a umidade relativa subiu consideravelmente apresentando valores entre 80,4 % e 99,9%, com valor médio de 89,5%, mostrando que de fato os produtos impermeabilizantes foram capazes de penetrar no interior do concreto até a profundidade estudada (seis centímetros).

Para analisar o desempenho dos produtos foram utilizados os valores médios dos dois corpos de prova, onde cada CP possuía dois orifícios (A e B). Os valores médios de temperatura – T (em °C) – e umidade relativa – UR (em %) – para cada produto são apresentados na Tabela 13. Os valores apresentados pelos CPs sem aplicação de produtos aparecem em destaque no final da referida tabela para servirem como comparação e neste caso tinham-se três CPs para cálculo das médias.

A fim de avaliar o desempenho dos produtos foram calculadas as diferenças dos valores de umidade entre ciclos consecutivos e também a diferença total entre o último ciclo e o valor inicial. As diferenças dos valores de umidade entre os ciclos são mostradas na Tabela 14, onde se pode verificar que ao final do primeiro ciclo, no qual os CPs ficaram na câmara úmida, pode-se destacar que a umidade média nos CPs sem impermeabilização variou de 83,9% para 95,7%, representando 11,8% de diferença. O produto impermeabilizante que se destacou negativamente foi E11 que permitiu o aumento de 6,5% no valor de UR.

Tabela 13- Médias de Temperatura e Umidade para cada produto ao longo dos ciclos.

Produto	Inicial		1: Câmara úmida		2: Câmara úmida		3: Exposto ao sol		4: Exposto ao sol		5: Câmara úmida		6: Câmara úmida		7: Câmara úmida		8: Câmara úmida	
	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)	T (°C)	UR (%)
A1	22,0	87,8	18,6	88,0	20,0	92,9	77,5	97,6	22,7	87,3	20,5	89,6	20,7	94,5	23,0	99,9	23,4	99,9
A2	22,1	90,4	18,8	90,7	20,0	91,4	25,7	89,4*	22,6	86,4	20,5	86,0	21,3	88,7*	22,2	91,0*	23,1	96,0*
B3	22,1	92,1	18,8	93,1	20,2	94,9	25,2	98,3	22,3	90,4	20,0	95,0	20,4	98,0	23,3	99,9	23,1	99,9
B4	22,1	91,8	18,3	95,8	19,8	99,8	24,5	99,6	22,1	98,0	20,1	98,1	20,4	98,4	21,9	99,9	23,2	99,9
C5	22,0	93,0	18,5	91,3	20,5	95,9	25,1	96,2	22,2	92,4	20,5	95,1	20,7	98,1	22,7	98,6	24,2	99,9
C6	22,1	92,6	18,9	88,9	20,1	95,3	24,1	97,4	22,1	91,2	20,4	90,7	20,7	96,7	22,0	97,8	23,9	99,9
D7	22,2	90,9	19,5	89,5	20,2	94,6	25,2	93,9	22,5	90,5	20,1	88,5	20,8	92,0	22,6	94,8	24,1	97,4
D8	22,0	91,1	19,0	88,6	20,4	93,4	25,0	94,5	22,2	86,0	20,6	90,4	21,1	93,1	22,6	95,1	24,1	98,7
D9	22,1	89,0	18,8	90,4	20,1	95,2	24,7	96,4	22,0	88,8	20,6	89,4	20,7	95,5	22,6	96,6	23,5	97,4
E10	22,0	86,9	18,9	86,1*	20,2	93,9	24,8	96,2	22,4	85,9	20,0	89,0	20,6	96,5	22,4	99,9	24,0	99,9
E11	22,2	86,4	18,7	92,9	19,5	99,9	25,5	99,9	22,3	99,9	20,0	99,2	20,3	99,6	22,7	99,9	23,5	99,9
F12	22,2	86,4	18,8	88,5	20,2	90,3	25,0	93,3	21,9	86,5	20,5	88,4	20,7	94,8	22,1	99,2	24,7	99,9
F13	22,1	90,6	18,6	89,5	20,3	92,3	83,7	95,7	22,5	88,2	20,0	87,9	20,5	95,1	21,9	97,1	23,5	99,6
F14	22,3	84,7*	19,3	87,9	20,4	88,2*	25,3	92,2	22,1	85,1*	20,2	85,1*	20,8	93,7	23,1	95,4	22,8	99,0
SEM PROD.	22,0	83,9	18,8	95,7	19,8	99,9	26,0	99,9	22,5	99,9	19,8	99,9	19,9	99,9	22,2	99,9	23,0	99,9

* menores valores de umidade em cada ciclo.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14- Diferenças de umidade entre os ciclos.

Produto	Diferença entre ciclos (valores de UR em %)									
	1 e inicial	2 e 1	3 e 2*	4 e 3*	4 e 2	5 e 4	6 e 5	7 e 6	8 e 7	8 e inicial
A1	0,2	4,9	4,7	-10,3	-5,7	2,4	4,9	5,4	0,0	12,1
A2	0,3	0,6	-2,0	-2,9	-4,9	-0,5	2,7	2,3	5,0	5,6
B3	1,1	1,8	3,5	-7,9	-4,4	4,6	3,0	1,9	0,0	7,9
B4	4,0	4,0	-0,2	-1,6	-1,8	0,0	0,3	1,6	0,0	8,1
C5	-1,7	4,6	0,2	-3,8	-3,5	2,7	3,0	0,5	1,3	6,9
C6	-3,8	6,4	2,1	-6,2	-4,1	-0,5	6,0	1,0	2,2	7,3
D7	-1,5	5,1	-0,7	-3,4	-4,1	-2,0	3,5	2,8	2,6	6,5
D8	-2,6	4,9	1,0	-8,4	-7,4	4,4	2,7	2,0	3,6	7,6
D9	1,5	4,8	1,3	-7,6	-6,4	0,7	6,1	1,1	0,8	8,4
E10	-0,8	7,8	2,3	-10,3	-8,0	3,1	7,5	3,5	0,0	13,0
E11	6,5	7,0	0,0	0,0	0,0	-0,8	0,5	0,3	0,0	13,5
F12	2,1	1,8	3,0	-6,8	-3,8	1,9	6,5	4,4	0,7	13,6
F13	-1,1	2,8	3,4	-7,5	-4,1	-0,3	7,2	1,9	2,5	8,9
F14	3,2	0,3	4,0	-7,1	-3,1	0,0	8,7	1,7	3,6	14,3
SEM PROD.	11,8	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,0

* dados podem estar comprometidos devido à temperatura dos corpos de prova.

Fonte: Próprio autor.

Entre o segundo e o primeiro ciclo, também em câmara úmida, foi verificado aumento da UR em todos os casos, mas com destaque positivo para os produtos A2 e F14 que apresentaram menores variações. Os produtos B3 e F12 também apresentaram variações irrisórias. Os destaques negativos são os produtos E10 e E11 que permitiram o aumento de pelo menos 7% no valor da UR.

Entre os ciclos dois e três os CPs estiveram expostos ao sol, mas ao final do ciclo três os CPs estavam ainda perdendo calor e por isso os valores de umidade deste ciclo podem estar comprometidos. Por isso, foi então comparada a diferença entre os ciclos dois e quatro, correspondendo então a duas semanas de exposição ao sol.

Comparando os valores entre os ciclos quatro e dois pode-se observar que houve diminuição dos valores de umidade, com exceção dos corpos de prova impermeabilizados com o produto E11 e os CPs sem impermeabilização. Nos dois casos os valores de UR se mantiveram em 99,9%.

Do final do ciclo quatro em diante os ciclos foram todos em câmara úmida e a partir daí os valores de UR aumentaram tendendo à saturação. Ao final do ciclo seis, de acordo com a Tabela 13, os valores de umidade estavam acima de 90% com exceção do produto A2.

Ao final do ciclo sete o número de produtos cujos CPs apresentavam umidade acima de 99% foram seis: os produtos A1, B3, B4, E10, E11 e F12. Já ao final do ciclo oito os produtos que não permitiram a saturação dos CPs foram A2, D7, D8 e D9 com destaque positivo para o produto A2 com o menor valor de umidade (96%).

Comparando-se a variação entre a umidade no início do experimento e ao final do último ciclo o produto A2 também se destaca positivamente com variação total de 5,6% correspondendo à diferença entre a umidade inicial de 90,4% até a umidade final de 96,0%. Devido ao seu desempenho em destaque, o produto A2 foi escolhido para ser utilizado no ensaio de expansão dos prismas de concreto.

De acordo com a ficha técnica fornecida pelo fabricante, o produto tem em sua composição copolímeros de butil acrilato e metil metacrilato em base solvente, com tempo mínimo de espera entre as demãos de 5 (cinco) horas.

Observa-se que a composição deste produto que se destacou não é à base de silanos/siloxanos, ou seja, não é a composição que a literatura atual tem indicado para a mitigação da RAA. Tanto é que ao final desta pesquisa, o produto já não estava mais disponível no catálogo de produtos do fabricante.

5.2 Comparação de resultados e validação do sensor aplicado

Durante o experimento que avaliou a umidade do ar no interior dos corpos de prova, foram verificados valores que não condiziam com o conceito dado aos produtos impermeabilizantes: que não permitem entrada de água no concreto. Então, ao se observar que os valores de umidade no interior dos CPs estavam aumentando consideravelmente, acreditou-se ser necessário comparar os resultados obtidos pelo sensor do DHT 22 com algum outro sensor.

Tendo em vista que o sensor tipo bastão estava disponível no LCEC e pronto para uso, foram feitas comparações dos resultados obtidos pelos dois sensores, a fim de confirmar que realmente a umidade dos corpos de prova estava aumentando, mesmo tendo sido impermeabilizados. Como já citado anteriormente, o sensor do tipo bastão tem seu uso consagrado na medição de umidade em materiais da construção civil como concreto e madeira, sendo estas as principais indicações de uso pelo fabricante.

A comparação foi feita em diversas ocasiões, medindo-se a umidade e a temperatura, tanto no interior dos orifícios dos corpos de prova, quanto no ambiente da sala onde os dados eram adquiridos. A Tabela 15 resume os valores obtidos durante as comparações.

Tabela 15- Comparação dos valores obtidos pelos sensores.

Corpos de prova		Ambiente	
Bastão	DHT 22	Bastão	DHT 22
90%	90,9%	57%	57,0%
20°C	20,9°C	21°C	22,0°C
92%	93,9%	60%	61,1%
20°C	20,6°C	22°C	22,1°C
99%	99,9%	58%	60,6%
20°C	20,4°C	22°C	21,6°C

Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que quando comparados os valores obtidos nos corpos de provas tem-se que enquanto o sensor do DHT 22 fornecia os valores de 90,9% de UR e 20,9°C de temperatura, o sensor do tipo bastão apresentou os respectivos valores de 90% e 20°C. Em outra ocasião teve-se 93,9% e 20,6°C para o sensor do DHT 22 e 92% e 20°C para o tipo bastão.

Ainda quando dispostos dentro de orifícios onde o ar estava saturado os valores também eram semelhantes, sendo 99,9% e 20,4°C para o sensor do DHT 22 e 99% e 20°C para o do tipo bastão.

Medindo-se os mesmo parâmetros no ambiente onde os CPs estavam dispostos, os valores foram 57,0% e 22,0° para o sensor do DHT 22 e 57% e 21°C para o tipo bastão. Em outra ocasião, os valores foram 61,1% e 22,1°C para o sensor do DHT 22 e 60% e 22°C para o do tipo bastão.

A Figura 86 mostra os sensores e equipamentos de aquisição dos parâmetros umidade relativa do ar e temperatura, em momento de aplicação para a comparação entre eles, que foi feita no ambiente da sala. Em seguida, é mostrado o resultado obtido simultaneamente pelo sensor DHT 22 (Figura 87).

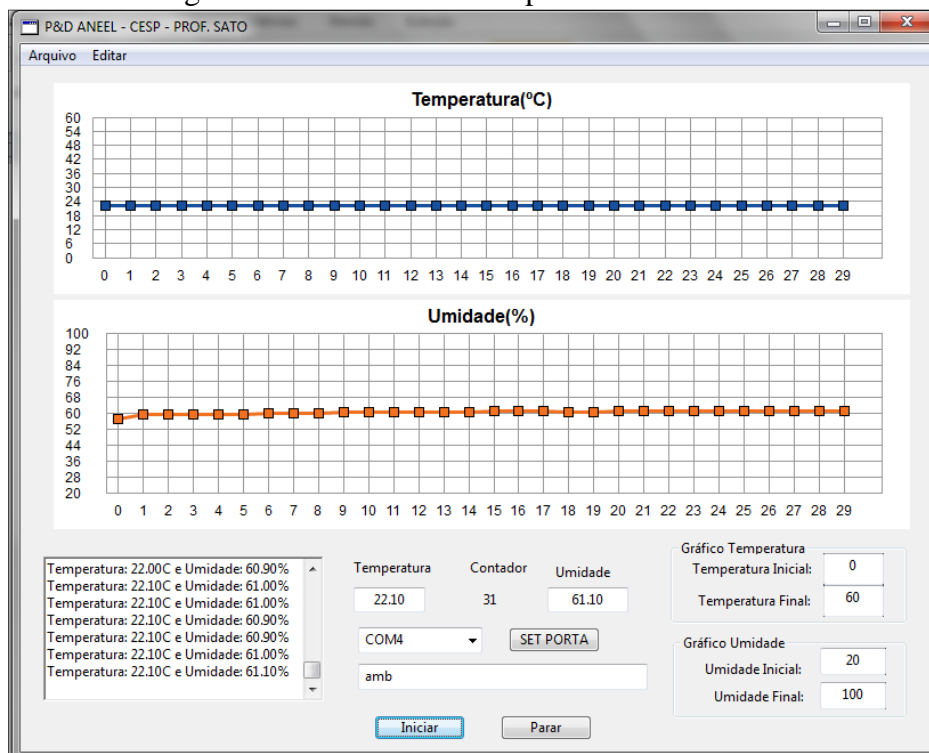
Diante dos valores apresentados pode ser destacado que os dois tipos de sensores apresentam resultados similares, validando então os resultados obtidos pelo tipo de sensor utilizado no projeto.

Figura 86- Comparação entre os sensores.



Fonte: Próprio autor.

Figura 87- Resultado obtido pelo sensor DHT 22.



Fonte: Próprio autor.

5.3 Umidade relativa no interior do concreto com mais de 40 anos de idade

Durante os estudos para escolha da textura do concreto e dimensões dos corpos de prova para o experimento que avaliou a eficiência dos impermeabilizantes, foi notado que havia bastante dificuldade para evaporar a água presente no interior do concreto. Na ocasião, foi constatado que até mesmo para concretos bastante permeáveis (permeabilidade K na faixa de 10^{-6} e 10^{-4} cm/s) foram necessários pelo menos 15 dias ininterruptos em estufa a 60°C , para diminuir apenas 20% da umidade relativa.

Assim, surgiu o questionamento quanto à umidade interna do concreto confeccionado em condições normais, devidamente dosado, vibrado e já curado há alguns anos. Com isso resolveu-se investigar a umidade de um dos corpos de prova mantidos no LCEC, no local conhecido como “cemitério”, onde estão estocadas amostras dos concretos estudados e utilizados nas obras das Usinas Hidrelétricas construídas pela CESP nas décadas de 1960 e 1970. A Figura 88 mostra o “cemitério” do LCEC nos dias atuais.

Figura 88- Corpos de prova das décadas de 1960 a 1970, no LCEC.



Fonte: Próprio autor.

No dia 16 de julho de 2013 foi aferida a umidade do ar interna em um dos corpos de prova do “cemitério”. O referido corpo de prova data de 20 de agosto de 1971, ou seja, tem aproximadamente 42 anos desde sua moldagem. Para verificar a umidade no interior do corpo de prova foi feito um orifício de 22 mm de diâmetro e 60 mm de profundidade e em seguida,

inserido o sensor do DHT 22, conforme mostra a Figura 89. Os valores obtidos foram 23,3°C de temperatura e umidade igual a 99,9%.

Figura 89- Verificação da umidade interna no concreto.



Fonte: Próprio autor.

Diante do valor obtido, realizou-se o mesmo procedimento em um dos pilares no edifício do LCEC e o alto valor de umidade se confirmou com os valores de 24,0°C de temperatura e 99,9% de umidade relativa. A estrutura data da década de 1960 e a Figura 90 mostra o local onde foi feita a mensuração. No horário em que foram feitas as medidas, a temperatura do ar no local era de 24°C e umidade relativa de 65,7%.

Figura 90- Pilar do LCEC onde foi medida a umidade interna no concreto.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados indicam então que não há razão para monitorar a umidade interna das estruturas da TA da UHE Jaguari, que era um dos objetivos iniciais do presente projeto, pois a umidade que será verificada com este tipo de sensor também será de 99,9%, visto que em

Jaguari as estruturas estão muito próximas da água do reservatório, garantindo assim maiores índices de umidade.

5.4 Eficiência do impermeabilizante e a evolução da expansão do concreto por RAA.

No ensaio para verificar se o impermeabilizante é capaz de mitigar as expansões devidas à RAA foram empregados prismas de concreto confeccionados com agregados classificados como potencialmente reativos com os álcalis, em testes realizados anteriormente por Marques (2009) em um ensaio adaptado da NBR 15577 parte 6, onde a temperatura foi elevada a 60°C, ao invés dos 38°C preconizados na norma.

Por isso, o presente ensaio foi conduzido na mesma temperatura (60°C) utilizada pela pesquisadora. Apesar do ensaio não ser conduzido na temperatura indicada pela NBR 15577-6 (ABNT, 2008), o valor de expansão limite indicado pela norma de 0,04% foi considerado como referência para as comparações que se seguiram.

As condições às quais os prismas foram expostos incluíram variações na umidade interna inicial dos prismas, na presença de impermeabilização superficial e também variação na presença de água no interior da câmara térmica. As condições são listadas e identificadas na Tabela 16.

Tabela 16- Condições nos prismas no ensaio de expansão.

Condição	Umidade interna	Superfície	Câmara térmica
1	seco	impermeabilizado	sem água
2	seco	impermeabilizado	com água
3	molhado	impermeabilizado	com água
4	molhado	sem tratamento	com água
5	molhado	sem tratamento	sem água

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos no ensaio são mostrados na Tabela 17 onde se tem as médias dos três prismas dispostos em cada uma das condições analisadas. Os mesmos resultados também são mostrados graficamente na Figura 91.

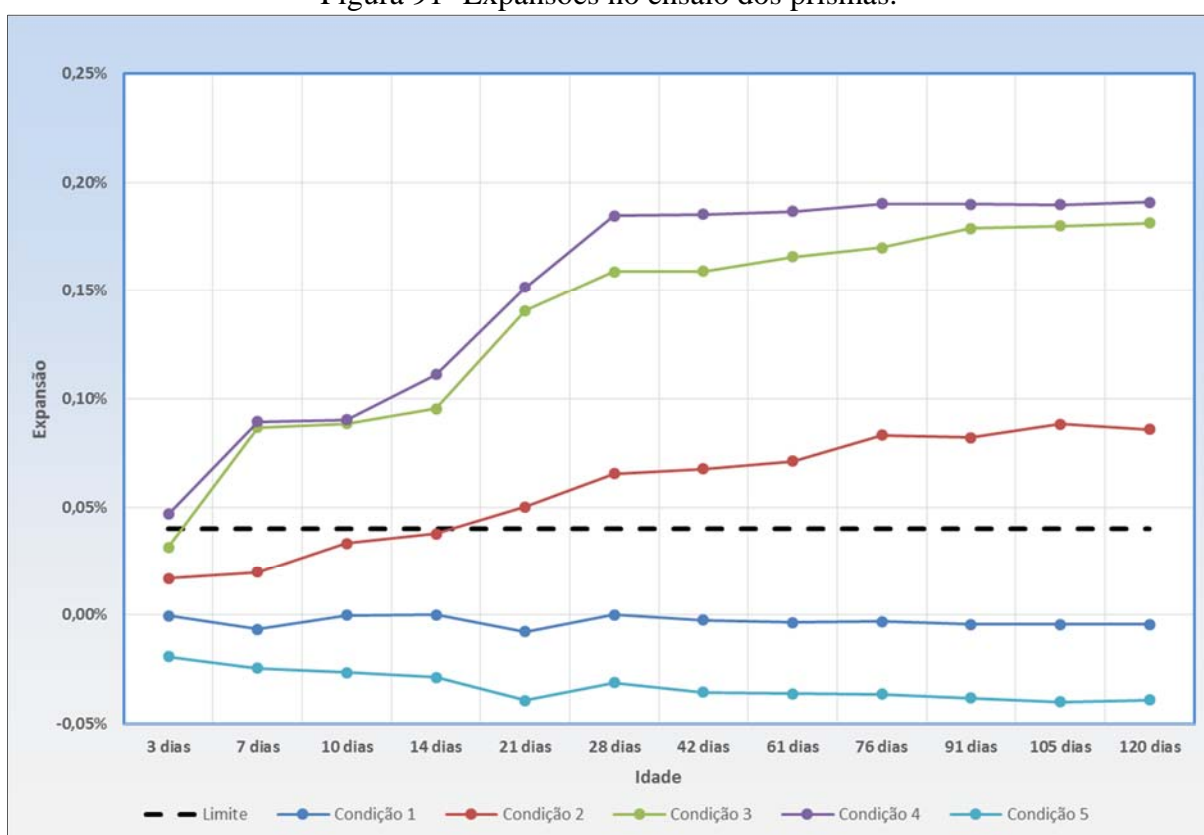
Tabela 17- Expansões verificadas nos prismas*.

Condição	Expansão em %											
	3 dias	7 dias	10 dias	14 dias	21 dias	28 dias	42 dias	61 dias	76 dias	91 dias	105 dias	120 dias
1	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09
3	0,03	0,09	0,09	0,10	0,14	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
4	0,05	0,09	0,09	0,11	0,15	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
5	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04

* em vermelho: valores acima de 0,04%.

Fonte: Próprio autor.

Figura 91- Expansões no ensaio dos prismas.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados indicam que independente do tratamento superficial (se impermeabilizado ou não) os prismas que permaneceram na câmara térmica que não continha água não apresentaram expansão. Os prismas que não foram secos antes do ensaio (condição 5) apresentaram acentuada retração devido à perda de água, totalizando ao final do ensaio uma retração de 0,04%. Já os prismas previamente secos e impermeabilizados (condição 1) mantiveram os comprimentos originais.

Todos os prismas mantidos na câmara térmica com presença de água apresentaram expansões acima de 0,04%, independente da umidade inicial interna ou do tratamento superficial.

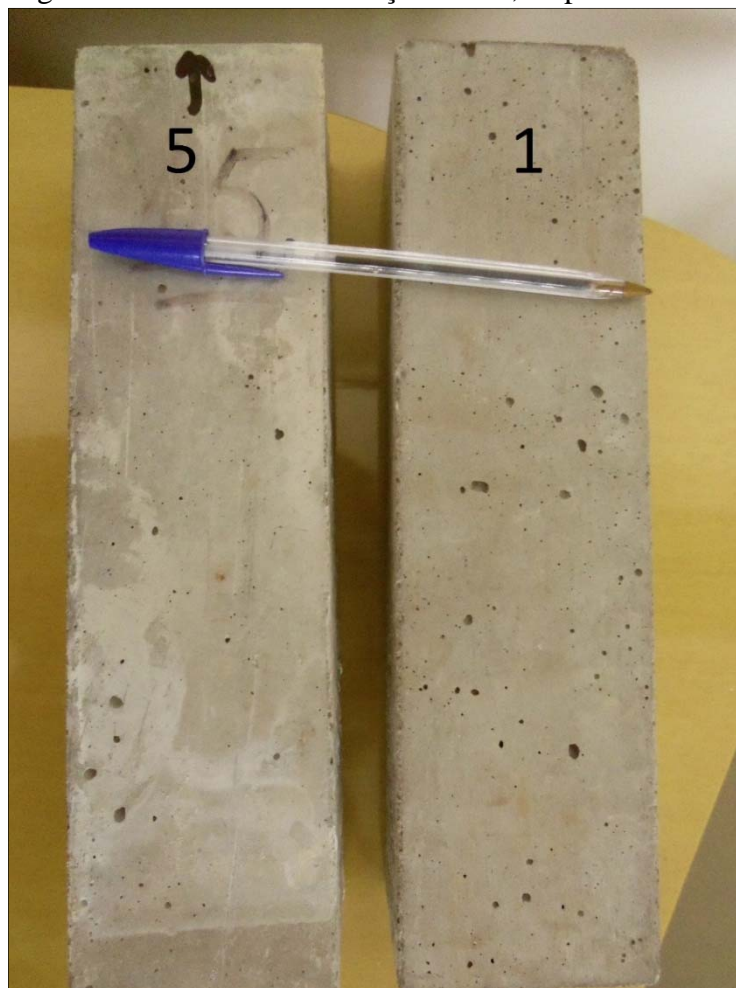
Os prismas tidos como padrão (sem secagem prévia e sem impermeabilização) da condição 4 apresentaram valores de expansão de 0,05% ainda aos 3 dias de ensaio, registrando expansão total de 0,19% ao final do ensaio. Os prismas que também não passaram por secagem prévia, mas que foram impermeabilizados (condição 3) apresentaram valores de expansão similares aos prismas tidos como padrão, ultrapassando o limite de 0,04% ainda aos 14 dias de ensaio e apresentando 0,18% de expansão ao final do ensaio, mostrando comportamento similar aos prismas na condição padrão.

Os prismas que foram previamente secos em estufa e impermeabilizados (condição 2) apresentaram valores de expansão menores, ultrapassando o limite de 0,04% aos 21 dias de ensaio, totalizando uma expansão de 0,09%. Assim pode se verificar que o estado de umidade inicial do concreto não preveniu a expansão dos prismas, mas certamente influenciou no valor final de expansão alcançado, que corresponde à metade do valor verificado para os prismas que não foram secos internamente.

Quanto ao aspecto dos prismas ao final do ensaio pode-se citar que os prismas que permanecerem na câmara térmica sem água não apresentaram fissuras significativas conforme pode ser observado na Figura 92. A diferença entre os conjuntos dos prismas é que os prismas da condição 5 apresentaram lixiviação de material branco conforme detalhado na Figura 93. O material lixiviado pode ser o gel resultante da RAA ou álcalis que estava contido no concreto. Recomenda-se análise desse material em trabalho futuros.

O aspecto final observado nos prismas mantidos na câmara térmica com água revela a presença de fissuras conforme pode ser observado na Figura 94. A abertura das fissuras observadas mostra que as mesmas são mínimas para os prismas da condição 2 (previamente secos e impermeabilizados). Já para os prismas padrão da condição 4 tem-se as maiores aberturas de fissuras. A condição 3, dos prismas que foram apenas impermeabilizados, mostra abertura de fissuras intermediárias.

Figura 92- Prismas das condições 5 e 1, respectivamente.



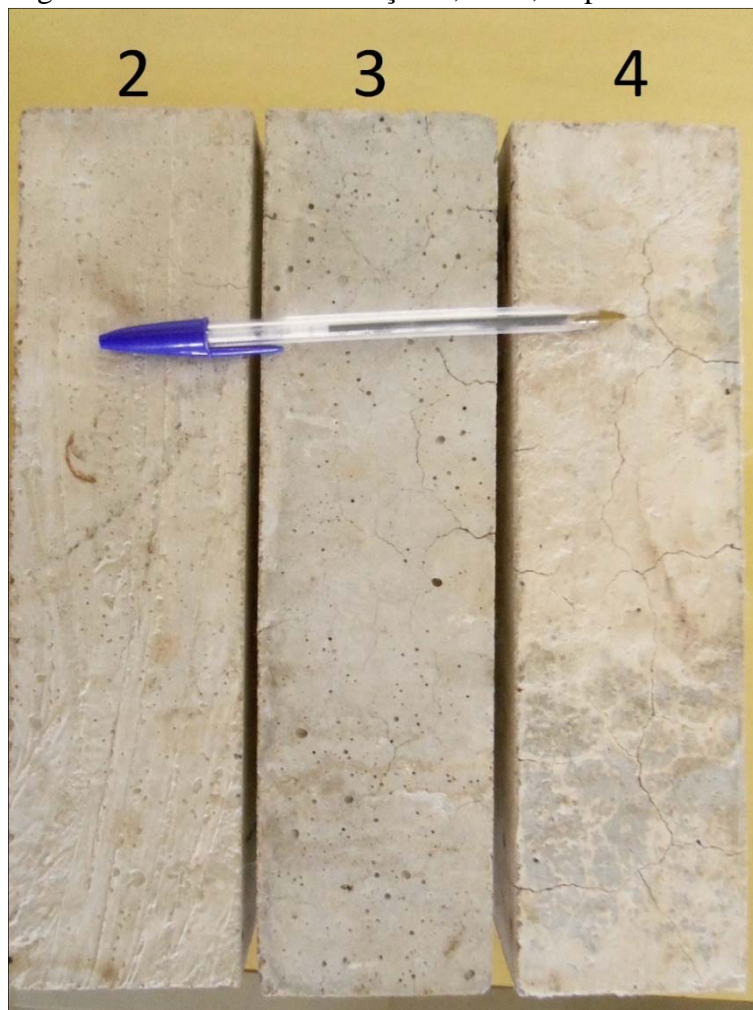
Fonte: Próprio autor.

Figura 93- Lixiviação do prisma da condição 5.



Fonte: Próprio autor.

Figura 94- Prismas das condição 2, 3 e 4, respectivamente.



Fonte: Próprio autor.

Assim, pode-se afirmar que a presença do impermeabilizante teve o efeito de diminuição na abertura das fissuras, mas que o efeito da umidade interna previamente contida no concreto influencia ainda mais no padrão de abertura visto que os prismas da condição 2 apresentaram fissuras mínimas.

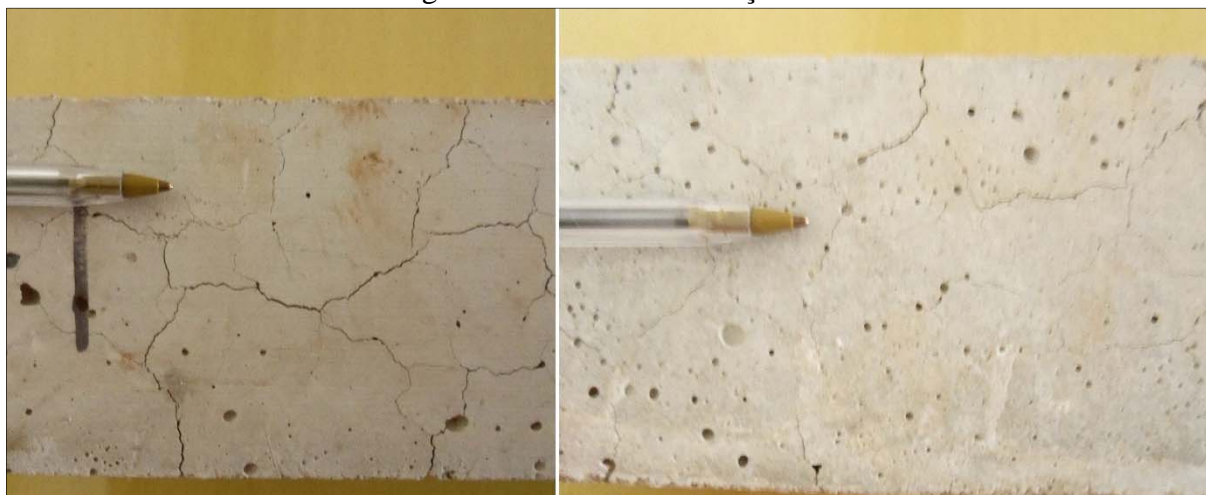
Ainda com relação à presença do impermeabilizante pode-se observar que o mesmo também diminuiu a lixiviação, pois dentre os prismas mantidos na câmara térmica com água, o prisma sem tratamento superficial apresentou alta quantidade de material branco lixiviado na superfície (Figura 95), enquanto que os prismas da condição 3 apresentaram pouca ou mínima presença (Figura 96) e os da condição 2 não apresentaram lixiviação.

Figura 95- Lixiviação do prisma na condição 4.



Fonte: Próprio autor.

Figura 96- Prisma da condição 3.



Fonte: Próprio autor.

Diante dos resultados obtidos, pode-se considerar que o uso do produto impermeabilizante utilizado não foi capaz de mitigar as expansões. Este resultado também confirma o que foi verificado no ensaio de eficiência feito anteriormente: que o produto vendido como impermeabilizante na verdade permite a entrada de água no concreto, permitindo assim que a RAA aconteça.

Ainda, é possível inferir que a umidade inicial presente no interior do concreto influencia no valor final da expansão e que a RAA é resultado não apenas efeito da umidade interna do concreto, mas sim a interação entre os teores de água presentes no ambiente e no interior do concreto.

Assim, uma forma de mitigar as expansões seria uma situação onde a umidade interna do concreto pudesse ser reduzida, seguindo-se de uma selagem efetiva da superfície, impedindo a entrada de água no interior de concreto. Mas essa selagem, deve ser conduzida

de maneira diferente da que foi empregada neste trabalho, pois conforme mostram os resultados obtidos, o procedimento adotado nos ensaios com uso dos produtos impermeabilizantes não trouxe os benefícios esperados. Como alternativa, sugere-se que a selagem seja conduzida por algum método de barreira à entrada da água no interior da massa de concreto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estruturas de concreto podem ser deterioradas por vários tipos de manifestações deletérias, que comprometem, entre outros itens, a durabilidade e a segurança da estrutura como um todo. Algumas destas podem ser facilmente confundidas com a RAA, como é o caso da formação da etringita tardia que, ao produzir um argilomineral, também apresenta as mesmas manifestações expansivas do gel branco criado pela RAA.

Por isso, este trabalho reuniu evidências de que as manifestações patológicas observadas na estrutura da TA UHE Jaguari são devidas à reatividade entre o agregado e o cimento utilizados na obra, baseando-se em trabalhos conduzidos anteriormente, cujo foco era a investigação das expansões verificadas na estrutura da Tomada d'Água da Usina, que foram evidenciadas desde a década de 1980.

Para monitoramento das expansões causadas pela RAA, já se tem instalado equipamentos que permitem monitorar a taxa de expansão da estrutura de concreto da TA através de mensurações sobre a abertura e evolução das fissuras, o deslocamento diferencial entre blocos e a elevação da estrutura devido à expansão. Com apenas sete meses de monitoramento Zoilo (2010) estimou uma taxa de expansão em torno de 30×10^{-6} por ano.

Neste trabalho, a taxa estimada por Zoilo (2010) foi confirmada e tem-se que após três anos mantendo este patamar, atualmente a taxa diminuiu e está em 15×10^{-6} por ano, mostrando que as expansões podem estar em fase de estabilização.

O mesmo comportamento também foi notado nos dados dos deslocamentos dos medidores tri-ortogonais instalados na TA: durante os primeiros anos de observação os deslocamentos cresceram com mais vigor do que o que é observado atualmente.

Visando aumentar a quantidade de dados monitorados na Usina, foram estudados sensores de umidade e de temperatura que pudessem compor um sistema de aquisição economicamente viável e aplicável, que necessitasse de pouca manutenção e acesso de dados de maneira remota.

Esse sistema seria responsável pelo monitoramento da umidade do ar no interior do concreto dos pilares contidos na TA, mas ainda antes que o sistema fosse concebido, verificou-se que a umidade relativa interna aferida pelo sensor em estruturas de concreto com mais de 40 anos de exposição externa e sem a presença próxima de corpos d'água é de 99,9%. Apesar dos dados fornecidos pelos sensores serem de caráter qualitativo, não figurando como valor real da umidade interna do concreto, pode-se confirmar o estado saturado do concreto

pois o mesmo era úmido ao toque logo após a abertura de orifícios a seis centímetros de profundidade.

Para este item, conclui-se que não há motivos para monitorar a umidade interna dos pilares da TA, visto que a umidade permanece presente no interior do concreto mesmo quando exposto ao ambiente externo. A diminuição dos teores de umidade diante da exposição ao sol só foram observados nos concreto dosados de maneira a permitir alta permeabilidade, fato que não está presente nos concretos usuais utilizados em obras como UHEs.

Como formas de mitigação para diminuir os efeitos da RAA foram apresentados alguns métodos que são pesquisados atualmente. Resultados satisfatórios apresentados em pesquisas recentes mostram o uso de produtos impermeabilizantes à base de silanos/siloxanos, alegando a eficiência dos produtos na diminuição das taxas de expansão ocasionadas pela RAA. Tendo em vista tais alegações, neste projeto, foram estudados 14 produtos impermeabilizantes compostos preferencialmente à base de silanos ou siloxanos, avaliando-se a umidade interna dos corpos de prova de concreto.

O concreto utilizado no ensaio que comparou a eficiência dos produtos impermeabilizantes possuía alta permeabilidade a fim de facilitar a entrada e saída de água no interior dos corpos de prova. Na profundidade de investigação de seis centímetros foi verificado que em todos os casos os produtos impermeabilizantes permitiram a entrada de água no interior dos corpos de prova, tendo que, entre todos os valores verificados, o menor teor de umidade verificada foi de 96%.

A fim de avaliar se o produto com melhor desempenho impermeabilizante seria capaz de mitigar as expansões causadas pela RAA conduziu-se um segundo ensaio com prismas de concreto confeccionados com o agregado potencialmente reativo proveniente da região da UHE Jaguari e cimento com alto teor de álcalis. Os prismas foram submetidos a cinco diferentes condições que variavam a presença de água no interior na câmara térmica, a aplicação do produto impermeabilizante e a umidade inicial interna no interior dos prismas. O ensaio foi conduzido de maneira acelerada na temperatura de 60°C.

Ao final do ensaio, aos 120 dias, observou-se que todos os prismas mantidos na presença de água apresentaram expansões significativas maiores que 0,04% que é o limite dado pela NBR 15577-1 (ABNT, 2008). A aplicação do impermeabilizante não foi suficiente para mitigar a expansão conforme verificado nas expansões finais que pouco diferem entre os prismas impermeabilizados (0,18%) e sem impermeabilização (0,19%). Nos prismas com umidade inicial reduzida e aplicação do impermeabilizante verificou-se que a expansão final

corresponde à metade do valor atingido no caso dos prismas sem secagem prévia, ficando no valor final de 0,09%.

Assim o que se percebe é que a reação álcali agregado realmente acontece devido à umidade no meio em que está situado o concreto e, ao mesmo tempo, também devido à umidade já presente no interior do concreto, conforme observado no ensaio com os prismas de concreto. Analisando-se de uma maneira geral os resultados apresentados no uso dos produtos impermeabilizantes, esperava-se que um produto impermeabilizante impedisse a entrada de água no concreto, o que não foi observado, pois em todos os casos tivemos aumento da umidade do ar no interior dos corpos de prova.

Sugestões para trabalho futuros:

Propõe-se que em trabalhos futuros referentes à reação álcali agregado ou ao monitoramento ou mitigação das expansões causadas pela RAA na UHE Jaguari sejam contemplados os seguintes itens:

- Avaliar a aplicação de produtos impermeabilizantes variando-se o método de aplicação e número de demãos a fim de verificar se assim será impedida a entrada da umidade externa na estrutura e acompanhar sua eficiência no controle da ocorrência da RAA.

- Pesquisar e implementar a possibilidade da diminuição da umidade interna do concreto *in loco*. Pois em laboratório foi verificado que o isso é possível colocando-se os corpos de prova dentro de estufas.

- Continuar a atualização de dados do sistema de monitoramento já instalado na UHE Jaguari.

- Implementar um sistema que monitore a abertura entre as guias metálicas ao longo dos 64 metros de comprimento, que funcione sobre condições de alta pressão e turbidez representada pelo fluxo de água.

Referências

ANDRIOLO, F. R. Observações de estruturas de concreto: validade quanto a ocorrência da reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI- AGREGADO EM ESTRUTURA DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Comitê Brasileiro de Barragens, Furnas Centrais Elétricas, 1997. p. 243-263.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15577-1:** agregados: reatividade álcali-agregado: parte 1: guia para verificação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008. p. 8.

_____. **NBR 15577-2:** agregados: reatividade álcali-agregado: parte 2: coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2008. p. 8.

_____. **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. p. 8.

_____. **NBR 15577-4:** agregados: reatividade álcali-agregado: parte 4: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008. p. 12.

_____. **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. p. 8.

_____. **NBR 15577-6:** agregados: reatividade álcali-agregado: parte 6: determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2008. p. 16.

_____. **NBR 7389-2:** análise petrográfica de agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1992. p. 5.

BERNARDES, H. M. **Retroanálise do efeito estrutural das reações álcali-agregado em barragens de concreto.** 2000. 142 f. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

BULLETIN 79. **Alkali-aggregate reaction in concrete dams:** review and recommendations. Paris: CIGB/ICOLD, 1991. ... p.

CARVALHO, A. M. A.; VIDAL, A. C. Delimitação do embasamento da Bacia Taubaté. **Revista do Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 11, n.1, p.19-32, abril de 2011. Disponível em: <<http://www.revistasusp.sibi.usp.br/pdf/guspvc/v11n1/02.pdf>> Acesso em: 12 set.2012.

CHAK, I. S. Alkali-aggregate reaction of concrete structures. In: CONCRETE SEMINAR, 1. 2005, Hong Kong. **Annual...** [S.I.]: [s.n.], 2005. Disponível em: <http://www.devb.gov.hk/filemanager/en/content_590/alkai_aggregate_reation_of_concrete_structures.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2014.

CHRISTOPHERSON, R. W. **Geossistemas: uma introdução à geografia física**. 7. ed. Porto Alegre. Bookman, 2012. 726 p.

COLLINS, C.; IDEKER, J.; WILLIS, G.; HURST, J. **Alkali-silica reaction the cancer of concrete**. Georgia: School of Civil and Environmental Engineering, 2012. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CC8QFjAB&url=http%3A%2F%2Fpeople.ce.gatech.edu%2F~kkurtis%2Fgwillis%2Ftutorials%2Fasr_theory_final.ppt&ei=ZHRQUJ39I4nA8ASjiYDwAw&usg=AFQjCNGXuZT_W7jiPJwC4-DyuJMssTZ77A>) Acesso em: 12 set.2012.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. **Usina hidrelétrica Jaguari**. São Paulo: [s.n., 2011?]. Disponível em: <http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_Usina_Jaguari?OpenDocument>. Acesso em: 06 ago. 2012.

DAVINO, A. Avaliação do potencial hidrogeológico da Bacia de taubaté (Vale do Paraíba do Sul) na região de Caçapava (SP). Emprego de métodos geofísicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11., 2000, Olinda. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2000. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/viewFile/23744/15815>>. Acesso em: 12 set.2012.

DECHICHI, M. **Reação álcali-agregado: estudo das propriedades elásticas e mecânicas através da utilização de inibidores**. 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

ESKRIDGE, A. E; KLINGNER, R. E.; KREGER, M. E.; FOWLER, T. J. Mitigation techniques for structures with premature concrete deterioration due to ASR/DEF. **Aci Materials Journal**, Farmington Hills, v. 106, n. 3 , p. 273-280, May/June 2009.

FERRARIS, C.F. **Alkali-silica reaction and high performance concrete**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1995. Disponível em: <<http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build95/art004.html>>. Acesso em: 11 set. 2012.

FIDELIS, G. C. **Umidade absoluta e relativa do ar**. Florianópolis: [s.n., 2013?]. Disponível em: <http://www.cect.com.br/Umidade_absoluta_relativa.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2013.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, v. 2, n. 27, p. 167-191, Aug. 2000.

GRASLEY, Z. C., **Internal relative humidity, drying tress gradients, and hygrothermal dilation of concrete**. 2003. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de ..., University of Illinois, Urbana, 2003

HASPARYK, N. P., **Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P., **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. 1999. 257 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 1999.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. 2 v., p. 933 – 1001.

JENSEN, V. Elgeseter bridge in trondheim damaged by alkali silica reaction: microscopy, expansion and relative humidity measurements, treatment with mono silanes and repair. In: EUROSEMINAR ON MICROSCOPY APPLIED TO BUILDING MATERIALS, 9., 2003, Trondheim. **Anais...** Trondheim: Norwegian Concrete And Aggregate Laboratory, 2003. p. 1 - 20.

KIHARA, Y. Reação álcali-agredao: aspectos mineralógicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986. p. 137-138.

KIHARA, Y.; SBRIGHI NETO, C.; KUPERMAN, S. C. Reação álcalis-agregado: visão atual e a situação brasileira. In: SIMPÓSIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO, 1., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON/USP, 1998. p. 1 - 25.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PÍNFAARI, J. C.; CARNEIRO, E. F. A Cesp e a detecção da reação álcali-agregado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26., Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia: CBGB, 2005. 14 p.

LANGE, D. A.; GRASLEY, Z.C.; RODDEN, R. Embedded Sensors for Internal Relative Humidity of Concrete. **Aci Materials Journal**, San Francisco, v. 252, Special Publications, p. 41-52, 2004.

MAINE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (DOT) E FHWA. Mitigating ASR in Maine Bridge Structures. **Reactive Soluitions**. Washington, v.3, n.3, 4p, [2012].

MARQUES, M. L. **Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais**. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MIZUMOTO, C., **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeitos de adições ativas na mitigação das reações álcali sílica e álcali-silicato**. 2007. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PAPPALARDO JUNIOR, A. **Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado**. 1998. 181 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. 1981. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

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. 1CD-ROM. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/17540228/PRODUTOS-DA-REACAO-ALCALISILICATO-EM-CONCRETOS-DE-EDIFICACOES-DA-REGIAO-DO-GRANDE-RECIFE-PE>> Acesso em: 29 set.2012.

POOLE, A. B. Introduction to alkali aggregate reaction in concrete. In: SWAMY, R. N. (Ed.). **The alkali-silica reaction in concrete**. Glasgow: Blackie and Son, 1992. p. 1-29.

RESENDEZ, A. Y. **Monitoring of an outdoor exposure site: evaluating different treatment methods for mitigation of alkali-silica reactivity in hardened concrete**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Faculty of the Graduate School, University of Texas, Austin, 2011.

RODRIGUES, R. O. **Estudo sobre modelagem matemática de estruturas de concreto afetadas por reações álcali-agregado**. 2002. 257 f. Tese (Pós-Doutorado) – Faculdade de Engenharia, University of California at Berkeley – UCB, Berkeley, 2002. (Relatório de Pesquisa).

RUST; C. K. **Role of relative humidity in concrete expansion due to alkali-silica reaction and delayed ettringite formation: relative humidity thresholds, measurement methods, and coatings to mitigate expansion**. 2009. 120f. Dissertação (Mestrado) – Faculty of the Graduate School, University of Texas, Austin, 2009.

SALLES, F. M. Identificação da RAA e monitoramento de estrutura afetada pela reação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2011, Fortaleza. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2011. 1CD-ROM.

SANCHEZ, L. F. M., FOURNIER, B., JOLIN, M., BASTIEN, J. Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, Kidlington, v. 56, p. 213-229, fevereiro de 2014.

SBARTAÏ, Z. M. et al. Effect of concrete moisture on radar signal amplitude. **Aci Materials Journal**, Farmington Hills, v. 103, n. 3, p. 419-426, 2006.

SILVA, C. F. C. **Análise de métodos de prevenção da reação álcali-agregado**: análise petrográfica e método acelerado de barras de argamassa. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2009.

SILVA, C. M. **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado**. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SILVEIRA, A. L. Z. P.; BATTAGIN, A. F.; MUNHOZ, F. A. C. Contribuição da análise petrográfica na identificação de minerais reativos em agregados para prevenção de manifestações patológicas devidas à reação álcali-agregado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54., 2012, Maceió. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2012. p. 107.

SILVEIRA, J. F. A. A importância dos extensômetros múltiplos na instrumentação de barragens afetadas pela RAA. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGB/FURNAS/IBRACON, 2006. 1CD-ROM.

STARK, D. The moisture condition of field concrete exhibiting álcali-silica reactivity (SP 126-49). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF CONCRETE, 2, 1991, Montreal. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute-ACI, 1991. p. 973-982. 1991

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Academic, 1997. 470 p.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a terra**: oficina de textos. São Paulo: [s.n], 2003. 568 p.

THOMAS, M.; BEAMAN, N.; HAYMAN, S.; GILKS, P. Evaluating ASR prevention strategies for the reconstruction of concrete structures at Mactaquac generating station. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 13., 2008, Tromdheim. **Anais...** Noruega: [s.n.], 2008. 1CD-ROM.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado**: mapeamento de agregados reativo do Estado de São Paulo. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

XU, Z.; HOOTON, R. D. **Mitigation of álcali ions in mortar due to several mechanisms.** *Cement and Concrete Research*, Kidlington, v. 23, n. 4, p. 951-961, 1993

ZOILLO, C. S. **Estudo de deslocamentos na tomada d'água da UHE Jaguari devidos à reação álcali-agregado.** 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.