

## **INVESTIGAÇÃO DA RAA EM TESTEMUNHOS DE CONCRETO PROCEDENTES DAS UHE's PAULO AFONSO I, II, III E IV**

**Anne Neiry de Mendonça Lopes<sup>(1)</sup>; Nicole Pagan Hasparyk<sup>(1)</sup>; Maurice Antoine Traboulsi<sup>(2)</sup>; Alberto Jorge C. Tavares Cavalcanti<sup>(3)</sup>; João Francisco Alves Silveira<sup>(4)</sup>**

*(1) MSc, Engenheira Civil, Centro Tecnológico de Engenharia Civil - FURNAS Centrais Elétricas S.A.*

*(2) Engenheiro Civil, Centro Tecnológico de Engenharia Civil - FURNAS Centrais Elétricas S.A.*

*(3) Engenheiro Civil, CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco*

*(4) Engenheiro Civil, COPEM Engenharia*

**Centro Tecnológico de Engenharia Civil - FURNAS Centrais Elétricas S.A.  
Caixa Postal 457, Centro – Goiânia/GO – CEP 74001-970  
e-mail: concreto@furnas.com.br**

**Palavras Chaves: Testemunhos - Concreto - Reação Álcali-Agregado - Propriedades - Petrografia**

### **RESUMO**

Este trabalho tem o objetivo de apresentar os resultados das investigações realizadas em testemunhos de concretos extraídos das UHE's PA I, II, III e IV, de propriedade da CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco que envolveram a determinação das propriedades mecânicas e elásticas, observações visuais e a caracterização petrográfica dos agregados constituintes, com o objetivo de se verificar a influência da reação álcali-agregado (RAA) nas estruturas de concreto. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de FURNAS Centrais Elétricas S.A., como parte da campanha de extração realizada no ano 2000. Os resultados obtidos indicam a potencialidade reativa dos agregados quanto à RAA, ratificando as observações de campo.

## **1 Introdução**

A RAA é um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os álcalis provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. Como resultado da reação, são formados produtos que na presença de umidade são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto (HASPARYK, 1999).

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), estruturas localizadas em ambientes úmidos, tais como barragens, estacas de pontes e estruturas marinhas podem ser deterioradas se estiverem sujeitas a este tipo de reação, podendo levar à perda de resistência e elasticidade, além de afetar a durabilidade do concreto.

Os primeiros casos de incidência da RAA foram constatados por STANTON (1940), em algumas estruturas de concreto que se apresentavam fissuradas na Califórnia. Apesar de não haver risco de ruptura catastrófica ou rápida nas barragens atacadas pela RAA, este fenômeno com progressão lenta pode provocar deterioração do concreto e instabilidade estrutural devido à expansão interna ou movimentações devido às variações volumétricas. Uma vez iniciado o processo, é difícil prever a evolução das expansões e do processo reativo.

São várias as estruturas hidráulicas catalogadas no mundo com registro da instalação de RAA, superando 140 casos. Dentre os países com maior incidência encontra-se primeiramente o Canadá, seguido pelos EUA; em terceiro lugar encontra-se o Brasil, e finalmente a África do Sul. Outros países possuem estruturas afetadas, porém com menor número de incidências (KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN, 1998). Alguns exemplos clássicos no Brasil da incidência da RAA são: Barragem Apolônio Sales (Moxotó), Barragem de Joanes, Barragem de Furnas, Barragem de Billings/Pedras.

## **2 Complexo Hidroelétrico de Paulo Afonso**

### **2.1 Características Gerais**

O Complexo Hidroelétrico de Paulo Afonso localiza-se no rio São Francisco, na cidade de Paulo Afonso - BA. As casas de força das usinas de PA I, PA II, PA III e PA IV são do tipo subterrâneo, acionadas por turbinas tipo Francis, cujas características principais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características das Usinas de Paulo Afonso I a IV

<b>Casa de Força</b>	<b>PA I</b>	<b>PA II</b>		<b>PA III</b>	<b>PA IV</b>
Dimensões da caverna (A/L/C) (m)	31/15/60	37/18/104		47/19/127	54/24/210
Nº de máquinas	3	3	3	4	6
Queda bruta (m)	81	82	81,5	82,5	112,5
Diâmetro túnel adutor (m)	4,8	5,2	5,2	8,0	8,7
Vazão nominal	90	110	125	266	385
Rotação (rpm)	200	200	200	138	120
Potência da turbina (MW)	60	75	85	216	410
Início operação	1954	1961	1967	1971	1979

A construção de Paulo Afonso I começou em março de 1949 e foi inteiramente executada pela CHESF. O aproveitamento consta de uma barragem de gravidade com comprimento total de 4.215 m, sistema extravasor com capacidade de 22.000 m³/s e uma casa de força subterrânea que começou a operar em 1954. A construção da segunda casa de força começou em 1955 e se deu em duas etapas. A primeira etapa, PA IIA, começou a gerar em 1961 e a segunda em 1967. A usina de Paulo Afonso III teve o início de construção em 1967 e está em operação desde 1971.

O aproveitamento de PA IV foi construído no período 1975-1979, tendo o enchimento do reservatório ocorrido em agosto de 1979 e as seis máquinas entraram em operação entre dezembro de 1979 e maio de 1983.

## 2.2 Materiais Empregados

O consumo médio de cimento empregado nos concretos das Usinas de Paulo Afonso I, II e III foi da ordem de 320 kg/m<sup>3</sup>, o que significa um consumo relativamente alto para obras desse porte. Os cimentos empregados na usina de Paulo Afonso I e II foram da marca Poty e Zebu, fabricados no Estado de Pernambuco. Os cimentos empregados em Paulo Afonso III e IV foram das marcas Poty, Nassau e Zebu, com teor de álcalis equivalente variando entre 0,6% e 1,0%. Em virtude de ter sido utilizado concreto bombeado na execução da casa de força de PA IV, o teor médio de cimento foi de 360 kg/m<sup>3</sup>, o que implicou em cerca de 3,0 kg de álcalis por metro cúbico de concreto. A relação água/cimento empregada foi igual a 0,53. Os agregados graúdos empregados nas usinas, cuja litologia está apresentada na Tabela 5, foram oriundos das escavações obrigatórias. Como agregado miúdo foram utilizadas areias naturais quartzosas.

## 2.3 Evidências da RAA

Os primeiros sintomas da RAA foram observados no final dos anos 70 em PA II, após a usina estar operando por 17 anos. Várias fissuras verticais e horizontais, acompanhando as juntas de concretagem foram observadas nas paredes do hall dos geradores. No começo da década de 80, alguns pilaretes de concreto que serviam de suporte para bandejas de cabos, entre os níveis dos pisos da turbina e do gerador, sofreram ruptura por esmagamento devido às expansões no concreto.

Abertura de juntas e deslocamentos diferenciais entre blocos foram observadas em Paulo Afonso I e III, em 1978 (KIHARA, SBRIGHI NETO & KUPERMAN,1998). A partir deste ano, as evidências de RAA nas estruturas das UHE de Paulo Afonso I e II ficaram mais nítidas, quando o quadro de fissuras, particularmente na região do octógono dos geradores, passou a ser bastante expressivo levando a CHESF à instalação dos primeiros instrumentos de auscultação. A suspeita de RAA nestas usinas, entretanto, somente se concretizou a partir de 1984, quando foram diagnosticados por Mr. Mielenz e pelos estudos realizados pela PROMON Engenharia, que os problemas que vinham afetando as unidades geradoras da UHE

de Moxotó estavam sendo provocados pela RAA (PAULON & CAVALCANTI, 1986). As primeiras evidências de reatividade álcali-agregado em PA IV foram observadas em 1985 na casa de força, em decorrência dos problemas observados com os equipamentos de geração e do quadro de fissuras nas estruturas de concreto, principalmente na região das paredes dos geradores e na laje da el. 144,0 m.

A comprovação da RAA no concreto de PA IV deu-se em setembro de 1988, quando foram detectadas evidências da RAA em amostras de concreto retiradas da galeria de el. 112,4 m. Os resultados dos exames petrográficos indicaram como mineral reativo o quartzo deformado, porém a reatividade apresentava-se em um estágio ainda incipiente.

Durante o período operacional foram observadas várias anomalias nas unidades hidrogeradoras de PA I, PA II, PA III e PA IV. Dentre os problemas observados destacam-se:

- Aquecimento dos mancais da turbina e do gerador;
- Inclinação do eixo das unidades geradoras;
- Desnivelamento do cone suporte das turbinas;
- Desalinhamento dos mancais das turbinas e geradores;
- Ovalização dos aros de saída e de descarga das turbinas;
- Inclinação das palhetas do pré-distribuidor;
- Descentragem do rotor da turbina e do gerador.

### **3 Programa Experimental**

#### **3.1 Extração, Preparação e Classificação dos Testemunhos**

As amostras foram extraídas das estruturas de concreto das casas de forças das UHE's PA I, II e III através de sondagens rotativas com coroa diamantada, com diâmetro de 200 mm e em Paulo Afonso IV com diâmetros de 200 mm e 76 mm. As condições de umidade das amostras de concreto foram preservadas, envolvendo-as com um filme de PVC, imediatamente após a retirada dos testemunhos das estruturas das usinas. Dessa forma, foram colocados em caixas de madeira e enviados ao Laboratório de Concreto do Centro Tecnológico de Engenharia Civil do

Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A, para a campanha de ensaios.

Para a realização dos ensaios, foi feita a classificação dos testemunhos em função das dimensões obtidas a partir da extração. Para a determinação das propriedades mecânicas e elásticas do concreto, os testemunhos foram cortados e tiveram seus topos retificados. Para os demais ensaios, os testemunhos foram cortados e preparados conforme especificação da CHESF.

A localização dos furos de sondagem foi a seguinte:

PA I - Furos SR1, SR3 e SR4, no piso de operação das turbinas (el. 144,0 m) das unidades 1, 2 e 3 respectivamente, com 3 m de profundidade na vertical. Furos SR2 e SR5, na parede do housing do gerador (el. 145,5 m) das unidades 1 e 3 respectivamente, com 1,5 m de profundidade horizontal.

PA II - Furos SR1, SR3, SR4 e SR5, no piso de operação das turbinas (el. 142,0 m) das unidades 2, 3, 4 e 5 respectivamente, com 3 m de profundidade na vertical. Furos SR2 e SR6, na parede do housing do gerador (el. 143,5 m) das unidades 2 e 5 respectivamente, com 1,5 m de profundidade horizontal. Furos SR7 e SR8, na parede da câmara das comportas (el. 135,0 m) das unidades 2 e 5 respectivamente, com 3 m de profundidade horizontal. As unidades geradoras 1 a 3 são de PA IIA e as 4 a 6, de PA IIB.

PA III - Furos SR2, SR3 e SR4, no piso de operação das turbinas (el. 141,0 m) das unidades 2, 3 e 4 respectivamente, com 3 m de profundidade na vertical. Furo SR1, na parede do housing do gerador (el. 142,5 m) das unidades 1, com 1,5 m de profundidade horizontal. Furos SR5 e SR6, na parede do poço de descida de materiais (el. 134,0 m) das unidades 2 e 4 respectivamente, com 3 m de profundidade horizontal. Furos SR7, SR8, SR11 e SR12 na parede da galeria de drenagem da tomada d'água, com profundidade horizontal máxima de 2,60 m. Furos SR9 e SR10, no paramento de jusante da tomada d'água, com profundidade horizontal máxima de 2,80 m.

PA IV - Furos EM1 a EM6, no piso de operação das turbinas (el. 136,0 m) das unidades 1 a 6 respectivamente, com diâmetro de 75 mm e profundidade vertical de 6 m, exceto o EM5 com 24 m. Furos AM1 e AM2, no teto da galeria de drenagem da elevação 112,0 m, com profundidade vertical máxima de 3,0 m.

## 3.2 Métodos de Investigação

### 3.2.1 Propriedades mecânicas e elásticas

Os métodos utilizados para a realização dos ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Métodos de ensaio

<b>Ensaio</b>	<b>Normas</b>
Resistência à compressão	NBR 5739/94
Módulo de elasticidade	NBR 8522/84 ASTM C-469/94.
Resistência à Tração por Compressão Diametral	NBR 7223/83

### 3.2.2 Análises petrográficas

As investigações petrográficas foram realizadas através de inspeção visual, microscopia estereoscópica (amostra em superfície plana semi-polida) e ótica, nos testemunhos de concreto extraídos das estruturas das UHE's Paulo Afonso I, II, III e IV. A análise macroscópica foi realizada observando-se as características dos agregados, argamassa, poros, entre outros aspectos. O objetivo da análise petrográfica foi o de identificar os aspectos estruturais e texturais do concreto bem como caracterizar petrograficamente os agregados através da identificação dos elementos constituintes no que diz respeito principalmente aos minerais considerados potencialmente reativos do ponto de vista da RAA. Os ensaios foram realizados conforme a NBR 7389/92, ASTM C-295/90 e ASTM C-856-95.

A investigação através do microscópio ótico polarizador de luz transmitida foi realizada a partir da observação de lâminas delgadas, com cerca de 30 µm de espessura, confeccionadas com amostras dos testemunhos de concreto.

Os aspectos estruturais e texturais do concreto caracterizados a olho nu e por microscopia estereoscópica foram: coloração da argamassa, distribuição e proporção dos constituintes, aderência pasta/agregado, adensamento do concreto, carbonatação e porosidade total.

As características relativas à RAA observadas foram: borda de RAA, microfissuras no agregado, na pasta e na interface e poros ou fissuras preenchidas por material.

## **4 Apresentação dos Resultados**

### **4.1 Propriedades Determinadas**

Na Tabela 3 estão registrados os resultados médios das propriedades mecânicas, elásticas e massa específica obtidos, por furo, de cada usina estudada. Nas Figuras 1 e 2 apresenta-se gráficos comparativos de valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por usina; cada valor (barra) representa a média de resultados de um furo. Nas Figuras 3 e 4 estão apresentados os valores de tração por compressão diametral e massa específica por usina; da mesma forma que as figuras anteriores, cada valor representa a média de resultados de cada furo (SR).

Tabela 3 - Resultados médios das propriedades determinadas

<b>UHE</b>	<b>Furo</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)</b>	<b>Massa Específica (kg/m³)</b>
<b>PAULO AFONSO I</b>	SR1	---	---	---	2402
	SR2	29,0	15,81	---	---
	SR3	14,0	16,29	---	2235
	SR4	25,3	24,78	1,55	2363
	SR5	29,3	17,48	2,62	---
<b>PAULO AFONSO II</b>	SR1	32,1	15,67	2,66	2365
	SR3	33,3	18,24	2,21	2409
	SR4	39,3	23,41	3,12	2394
	SR5	56,2	29,23	3,52	2439
	SR7	---	---	2,38	---
	SR8	37,8	21,09	---	---
<b>PAULO AFONSO III</b>	SR2	30,5	19,27	---	2352
	SR3	38,8	24,94	3,51	2358
	SR4	30,5	18,57	2,46	2355
	SR5	48,0	24,87	3,13	---
	SR6	41,9	20,82	2,35	---
	SR8A	36,6	23,93	1,73	---
	SR9	44,3	23,28	2,24	2405
	SR10	36,9	23,93	---	---
	SR11	---	---	2,19	---
	SR12A	38,8	16,88	2,41	---



UHE	Furo	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa)	Massa Específica (kg/m³)
<b>PAULO AFONSO IV</b>	AM1	37,1	23,10	Propriedades não determinadas	
	AM2	32,1	18,50		
	EM1	35,6	18,89		
	EM2	42,8	19,94		
	EM3	32,6	18,56		
	EM4	32,7	16,69		
	EM6	38,1	21,75		

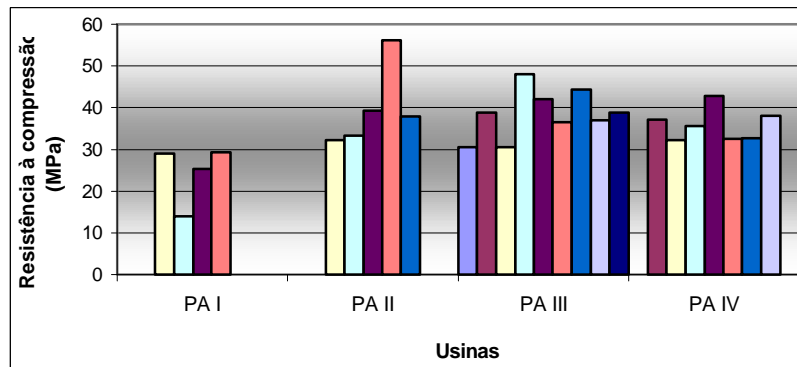


Figura 1 - Gráfico Comparativo dos Resultados de Resistência à Compressão por Furo, por Usina

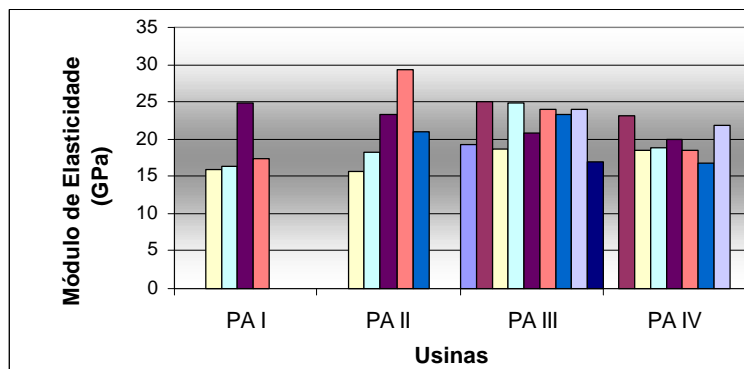


Figura 2 - Gráfico Comparativo dos Resultados de Módulo de Elasticidade por Furo, por Usina

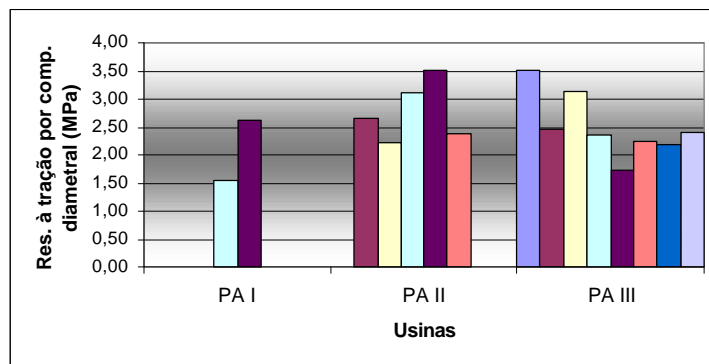


Figura 3 - Gráfico Comparativo dos Resultados de Resistência à Tração por Compressão Diametral por Furo, por Usina

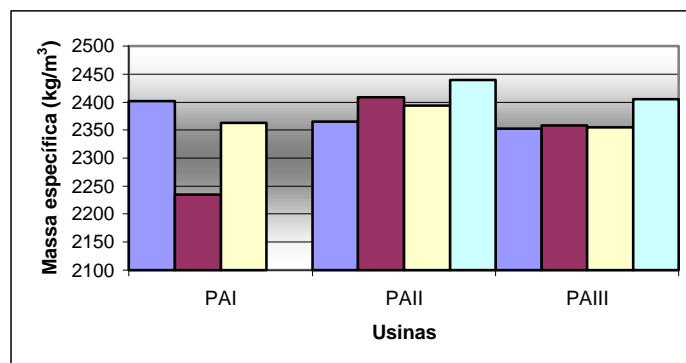


Figura 4 - Gráfico Comparativo dos Resultados de Massa Específica por Furo, por Usina

Na Figura 5 apresenta-se uma correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade dos resultados de ensaio, comparando os com a correlação proposta pelo projeto da norma NB 1. Na Figura 6 está ilustrada a correlação entre resistência à compressão e resistência à tração dos resultados de ensaios obtidos.

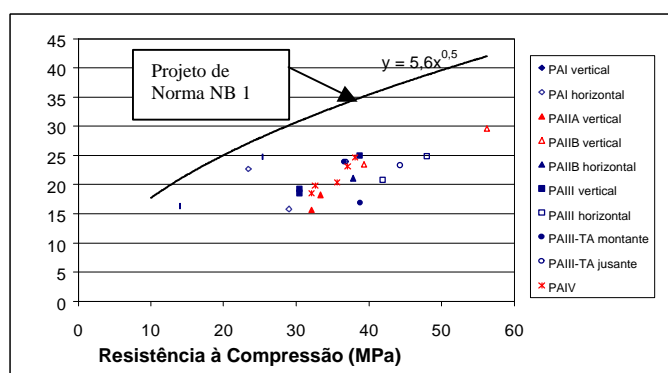


Figura 5 - Correlação entre Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

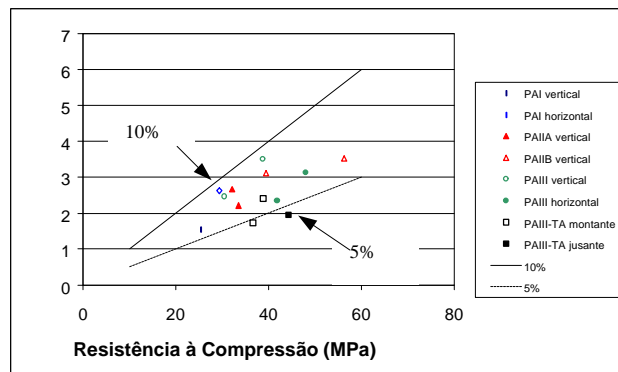


Figura 6 - Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral e linha de tendência correspondente a 5% e 10% da resistência à compressão

## 4.2 Investigações Petrográficas

### 4.2.1 Aspectos estruturais e texturais do concreto

Os aspectos estruturais e texturais do concreto foram determinados a olho nu e por microscopia estereoscópica, identificando também as características relativas à reação álcali-agregado.

O concreto dos testemunhos das usinas apresentou coloração da argamassa variando de cinza a cinza-escuro, com distribuição homogênea dos constituintes e sua proporção variou entre normal, ligeiramente argamassado e argamassado. A aderência pasta/agregado graúdo, o adensamento do concreto e a porosidade total apresentaram-se normais. A carbonatação estava ausente em todos os testemunhos. Com relação a estes aspectos, não se observou diferenças significativas entre os testemunhos analisados.

No que diz respeito às características relativas à RAA, observou-se algumas diferenças entre os vários testemunhos para uma mesma usina, conforme pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Características relativas à reação alcali-agregado

Identificação do Testemunho		Borda de RAA	Microfissuras no Agregado	Microfissuras na Pasta	Microfissuras na Interface	Poros ou Fissura Preenchidos <sup>(1)</sup>		
SR1	PA I	Ausente	Presente	Ausente	Ausente	Presente		
SR2			Ausente		Presente			
SR4		Presente	Presente	Ausente	Ausente			
SR4								
SR5		Ausente	Ausente					
SR1	PA II	Presente	Presente	Presente	Ausente	Presente		
SR3				Ausente	Ausente		Ausente	Presente
SR5		Presente	Presente					Presente
SR5				Ausente	Ausente		Ausente	
SR6		Presente	Presente					Presente
SR8				Ausente	Ausente		Ausente	
SR1	PA III	Presente	Presente			Ausente		Presente
SR2			Ausente	Presente	Ausente			
SR5		Ausente	Ausente		Presente		Ausente	
SR6							Presente	Presente
SR6		Ausente	Ausente	Ausente	Presente			
SR7						Presente	Presente	Presente
SR7		Ausente	Ausente	Ausente	Ausente			
SR8						Presente	Ausente	Ausente
SR9		Ausente	Ausente	Ausente	Ausente			
SR10						Presente	Ausente	Ausente
SR11		Ausente	Ausente	Ausente	Ausente			

Nota 1: Os poros e fissuras apresentam-se preenchidos por material branco, provavelmente gel.

As características relativas a RAA, de uma maneira geral, observadas nos testemunhos de Paulo Afonso IV foram bordas de RAA e poros revestidos ou preenchidos por material. Não foram identificadas fissuras na argamassa.

#### 4.2.2 Caracterização petrográfica

Os agregados constituintes dos testemunhos de concreto analisados são provenientes de rochas de natureza ígnea e metamórfica. A Tabela 5 apresenta as litologias identificadas nas várias UHE's estudadas. A composição principal, na maioria, é feldspato, quartzo e biotita/muscovita.

Tabela 5 - Litologias dos agregados identificadas nos vários testemunhos de concreto analisados

<b>UHE</b>	<b>Litologias dos agregados identificadas</b>
PAI	granito, biotita gnaisse e biotita granito
PAII	granito e anfibólio gnaisse
PAIII	granito e biotita granito
PAIV	granito, biotita gnaisse, biotita granito, anfibólito e anfibólio biotita gnaisse

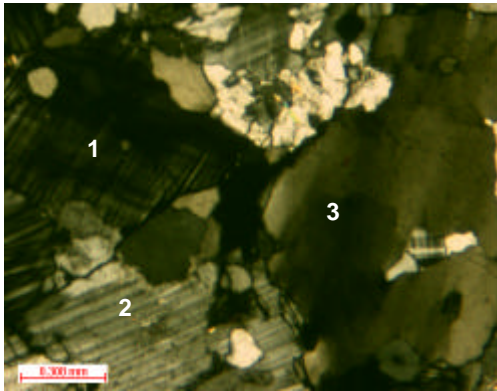
Do ponto de vista da potencialidade reativa estão presentes, em todas as amostras analisadas, os feldspatos alcalinos (microclina), o quartzo deformado com extinção ondulante e grão de quartzo estirado, este último observado apenas em PAI.

Em PAII, III e IV verifica-se a presença de feldspatos saussuritizados, com alterações argilosas; ressalta-se que esta característica também favorece a instalação de reações expansivas. Já em PAI (furos SR2 e SR4) e PAIII (furo SR6) observa-se a característica de encurvamento das lamelas de geminação do feldspato, que também está relacionada a processos de deformação da rocha.

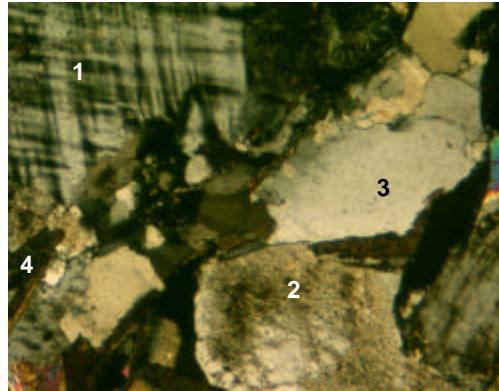
Tanto em PAI quanto em PAII, furos SR4 e SR3, respectivamente, foi verificado material incolor, quase isótopo, sugerindo a ocorrência da RAA.

As características observadas em Paulo Afonso III são mais marcantes. Na amostra proveniente do furo SR6 foi observada forte extinção ondulante do quartzo, quando comparado com as demais amostras analisadas, além de fissuramento e fragmentação do quartzo e feldspato. Foi identificado, durante as análises, quartzo com contatos suturados na amostra proveniente do furo SR5, sendo esta característica relacionadas a processos metamórficos e de deformação da rocha. Em relação às amostras de furos SR7 e SR9, os agregados e minerais apresentam-se intensamente fraturados.

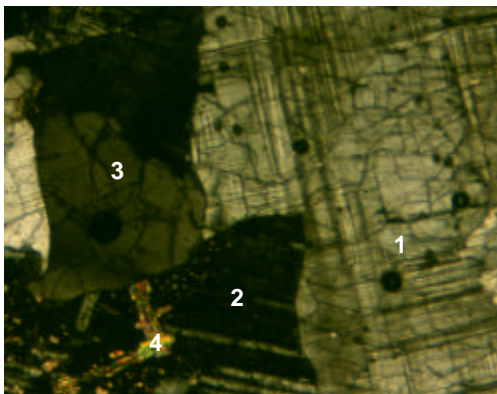
As Micrografias 1 a 4 ilustram os minerais constituintes dos testemunhos dos furos SR2 (PA I), SR5 (PA II), SR9 (PA III) e EM4 (PA IV), através do microscópio ótico, respectivamente.



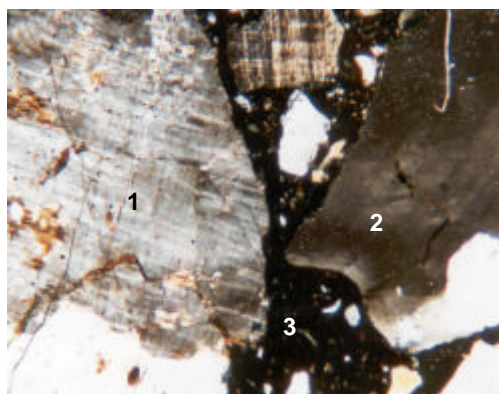
Micrografia 1 - Aspecto geral do granito, mostrando a composição mineralógica principal, 1. K-feldspato e 2. Plagioclásio com geminações características e 3. Quartzo com extinção ondulante - SR2-PAI



Micrografia 2 - Granito exibindo: 1. K-feldspato (microclina) com geminação em malha; 2. plagioclásio com minúsculas inclusões de argila (alteração); 3. quartzo com extinção ondulante; 4. palhetas de biotita - SR5-PAII



Micrografia 3 – Granito, aspecto geral.  
1. Grande cristal de K-feldspato (microclina);  
2. Plagioclásio; 3. Quartzo (cristais fraturados);  
4. Mica (colorida) - SR9-PAIII



Micrografia 4 - Vista geral da lâmina. 1. Feldspato potássico; 2. Quartzo com extinção ondulante; 3. Argamassa - EM4-PAIV

## 5 Considerações

Sabe-se que existe uma proporcionalidade entre o módulo de elasticidade do concreto e a raiz quadrada de sua resistência a compressão. O projeto da norma NB-1 indica a relação  $E = 5600 \times f_c^{1/2}$ . Plotando-se os valores dos ensaios de resistência e módulo obtidos, e comparando-os com a fórmula do projeto de norma (Figura 5), pôde-se observar que os valores são inferiores à curva teórica, sendo que PA I foi a menos afetada. Este comportamento já foi constatado em outras obras (CAVALCANTI et al., 2000). A usina de PA I é de fato a que tem apresentado menos evidências da RAA, o que se deve provavelmente a um menor teor de álcalis do concreto.

O processo de deterioração causado pela RAA tem como conseqüências uma pequena queda na resistência à compressão, uma perda maior da resistência à tração e uma acentuada redução do módulo de elasticidade (LARIVE, 1997). O ensaio de módulo de elasticidade no concreto não afetado pela RAA, utilizando a mesma composição dos testemunhos extraídos, poderia indicar o quanto decresceu o valor do módulo de elasticidade do concreto deteriorado. Na Barragem de Furnas, quando se comparou os resultados dos testemunhos extraídos com o concreto moldado, verificou-se uma redução da ordem de 50% no módulo de elasticidade (CASTRO et al., 1997).

Quanto à resistência à tração por compressão diametral, observa-se na Figura 6 que todos os resultados situam-se abaixo da reta correspondente a um percentual de 10% da resistência à compressão. Dois furos da tomada d'água de PA III ficaram abaixo do limite de 5%.

Portanto, com base na degradação do módulo de elasticidade e da resistência à tração, pode-se inferir que a usina de PA I é a menos afetada pela RAA enquanto que a tomada d'água de PA III está no outro extremo, o que é consistente com o comportamento observado nos protótipos.

As diferenças observadas nos resultados obtidos podem ter ocorrido em função dos diferentes estágios em que se encontra a reação álcali-agregado das amostras, que é influenciada por fatores como o teor de álcalis do cimento, teor de cimento do concreto, disponibilidade de umidade, idade da estrutura, tensões de confinamento e temperatura.

Quanto às investigações petrográficas, as amostras analisadas apresentam características estruturais e texturais típicas de concretos submetidos a processos normais de preparação e dosagem, com adensamento normal, distribuição homogênea dos constituintes, boa aderência pasta/agregado, porosidade normal e ausência de carbonatação.

As características petrográficas dos agregados observadas no Centro Tecnológico de FURNAS Centrais Elétricas S.A. evidenciam a presença de deformação tectônica

refletida pela extinção ondulante nos cristais de quartzo (quartzo deformado), de feldspatos alcalinos e também a presença de elevado grau de alteração hidrotermal dos feldspatos. Estes ensaios vieram confirmar os ensaios petrográficos realizados por Richard Mielenz, em 1984, com amostras da UHE de Moxotó, localizada nas proximidades de Paulo Afonso, caracterizando a ocorrência de RAA e identificando o quartzo deformado como principal mineral reativo. As características supracitadas têm sido observadas em agregados considerados potencialmente reativos, no que diz respeito à reação álcali-agregado.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem à CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco pela autorização para divulgação das informações contidas neste trabalho.

## 7 Referências Bibliográficas

- CASTRO, C. H.; GUERRA, E. A.; FONTOURA, J. T. F.; GRAÇA, N. G. Estudo comparativo de propriedades do concreto afetado pela reação álcali-agregado. **In: Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Anais...**Goiânia. CBGB/FURNAS/IBRACON, 1997. p.45-51.
- CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F. A.; DEGASPARE, J. C. AAR management at Paulo Afonso IV power plant. **In International Conference in Alkali-Aggregate Reaction, 11. Proceedings...**Quebec City, Canada, June 2000. p. 1263-1272.
- GRATTAN-BELLEW, P. E.; DANAY, A. Comparison of laboratory and field evaluation of alkali-silica reaction in large dams. **In: First International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, 1. Proceedings...**Fredericton: CEA - Canadian Electrical Association, 1992. p.1-23.
- HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado - efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Goiânia, 1999. 257p. Dissertação (Mestrado) - UFG, Escola de Engenharia Civil.
- HOBS, D. **Alkali-silica reaction in concrete.** London: Thomas Telford, 1988. 183p.
- KIHARA, Y.; SBRIGHI NETO, C.; KUPERMAN, S. C. Reação álcalis-agregado: visão atual e a situação brasileira. **In: Simpósio Sobre Durabilidade do Concreto. Anais...**São Paulo: IBRACON/USP, 1998.
- LARIVE, C. **Apport combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'álcali-reaction et ses effets mécaniques.** Paris, 1997. PHD Thesis.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Ed. Pini, 1994.
- PAULON, V. A.; CAVALCANTI, A. J. Alkali-aggregate reaction at Moxotó Dam. **In: International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 7. Proceedings...**Ottawa/Canada 1986. p.1-5.
- STANTON, T. E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. **In: Proceedings of American Society of Civil Engineers,** Dec. 1940, p. 1781-1811.