ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE AMOSTRAS DE ÁGUA PERCOLADA ATRAVÉS DO CONCRETO: ESTUDO DESENVOLVIDO NA ECLUSA 1 DA BARRAGEM DE TUCURUÍ

T. OLIVEIRA
Engenheira Civil
Universidade Federal do Pará
Parauapebas / Pará; Brasil
thaisvaladares.94@gmail.com

A. NOGUEIRA
Engenheiro Civil
Eletrobras Eletronorte
Tucuruí / Pará; Brasil
andre.nogueira@eletronorte.gov.br

M. MENEZES
Químico
Eletrobras Eletronorte
Tucuruí / Pará; Brasil
mayko.menezes@eletronorte.gov.br

RESUMO

O concreto é um material normalmente poroso e a interconexão entre os poros presentes em sua microestrutura conduz uma de suas principais propriedades, a permeabilidade. Quanto maior esta for, maior a permissividade do concreto à entrada de agentes agressivos. A percolação de água através deste material, por exemplo, é capaz de desencadear um fenômeno denominado lixiviação. A este trabalho compete a análise físico-química de águas percoladas através do concreto, comparando-as com amostras de água coletadas em pontos "pré-percolação", de modo a identificar alterações em seus parâmetros físico-químicos e discutir sua procedência. A pesquisa esteve pautada em um estudo de caso realizado na Eclusa 1 do Sistema de Transposição de Desnível da Barragem de Tucuruí, onde está instalada a Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí), em Tucuruí, Pará. Foram comparadas a água do reservatório da barragem e a água lixiviada através do concreto, vertida pelos drenos da estrutura. Entre os parâmetros físico-químicos analisados estão: potencial hidrogeniônico (pH), cor, alcalinidade, teores de cálcio e magnésio, e outros. Como esperado, considerando outros estudos acerca da lixiviação do concreto, os íons cálcio foram os que apresentaram maior concentração nas amostras coletadas nos drenos, se comparadas as da água do reservatório. Logo, a hidrólise dos componentes da pasta cimentícia está ocorrendo.
Palavras-chave: Lixiviação. Concreto. Análise físico-química. Água percolada. UHE Tucuruí.

ABSTRACT

Concrete is a material usually porous and the interconnection between the pores present in its microstructure leads one of its main properties, the permeability. The greater it is, the greater the permissiveness of concrete to the entrance of aggressive agents. The percolation of water through this material, for example, can trigger a phenomenon known as leaching. The aim of this work is the physical-chemical analysis of water percolated through the concrete, comparing it with samples of water collected at "pre-percolation" points, to identify changes in their physical-chemical parameters and discuss their origin. The research was based on a case study made in the Lock 1 of the Transposition System of Tucuruí Dam, where the Hydroelectric Power Plant of Tucuruí (HPP Tucuruí) is installed, located in Tucuruí city, state of Pará, Brazil. The water of the dam reservoir and the water leached through the concrete, that goes out through the drains of the structure, were compared. Among the physical-chemical parameters analyzed are: hydrogenionic potential (pH), color, alkalinity, calcium and magnesium contents, and others. As expected, considering other studies about the leaching of the concrete, the calcium ions reached the highest concentrations in the samples from the drains, when compared to the water in the reservoir. So, the hydrolysis of cement components is occurring.
Keywords: Leaching. Concrete. Physical-chemical analysis. Percolated water. HPP Tucuruí.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na indústria da construção civil, basicamente composto por meio da mistura entre água, cimento, agregado miúdo (normalmente areia) e agregado graúdo (comumente seixo ou brita). Eventualmente, entram também em sua composição aditivos e adições, empregados com as mais diversas finalidades. A associação entre a água e o cimento presentes em sua mistura forma a chamada pasta de cimento, a qual influência em diversas características intrínsecas do material, como sua permeabilidade, resistência, flexibilidade de formatos e outras.

Como citado por Mehta e Monteiro (2014), considerando uma análise microestrutural, esta pasta é composta, primordialmente, por: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que constitui entre 50 e 60% do volume de sólidos presentes na pasta hidratada e tem sua resistência influenciada por forças de atração de Van der Waals; cristais de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), que representam de 20 a 25% dos sólidos na pasta e contribuem também para a resistência da mesma; sulfoaluminatos de cálcio, que tem papel secundário na condução das propriedades do material, mas ainda constituem entre 15 e 20% de seu volume de sólidos; grãos de clínquer não hidratados, cuja quantidade dependerá da distribuição do tamanho das partículas de cimento não hidratado e da idade da pasta (grau de hidratação); vazios, inevitavelmente presentes e capazes de influenciar em suas propriedades, afetando sua resistência à compressão e permeabilidade se grandes (acima de 50 nm), e em fênomenos como a retração por secagem e a fluência, quando pequenos (inferiores a 50 nm); e água, cuja quantidade presente na pasta depende muito de sua porosidade e da umidade ambiente.

O concreto, assim como qualquer outro material, é suscetível a uma série de patologias, capazes de afetar potencialmente sua durabilidade. Entre estas, pode-se citar a carbonatação, a reação álcali-agregado, a lixiviação, e tantas outras. Dentre as três citadas, a última é uma das menos estudadas. Como citam Glasser, Marchand e Samson (2008), a ocorrência da lixiviação é comum em barragens e tubulações de água, por exemplo, onde o contato com águas puras ou ácidas é recorrente, sendo consequências costumeiras de seu desenvolvimento em uma estrutura o aumento da porosidade e da permeabilidade do concreto da mesma, bem como a perda de sua resistência mecânica.

Para uma conceituação básica da patologia, é possível descrever a lixiviação enquanto uma reação química de difusão, desencadeada a partir do contato entre o concreto e águas ácidas ou pobremente mineralizadas, sendo esta também denominada na literatura de hidrólise dos componentes da pasta de cimento (SICAKOVA; ESTOKOVA, 2014). Por meio dela, sáis solúveis são carreados do concreto, devido à passagem de água através deste material. Dentre os elementos da pasta, um dos mais suscetíveis ao ataque por esta reação é o hidróxido de cálcio, responsável também pela manutenção da alcalinidade do concreto. Com a redução do pH do material, devido à hidrólise do hidróxido de cálcio, e o aumento de sua permeabilidade, a entrada de agentes agressivos presentes no meio é facilitada, o que pode prejudicar tanto o concreto quanto sua armadura, sendo o início da corrosão dela em alguns casos motivado pela própria lixiviação (CPWD, 2002).

Durante o desenvolvimento do processo de lixiviação, inicialmente as moléculas de água desencadeiam a reação de difusão à nível microestrutural, dissolvendo os elementos presentes nas paredes dos poros do concreto. Na sequência, componentes sólidos são também hidrolisados pela água e levados do ponto de ocorrência da reação para a solução disponível no interior do poro, de onde são transportados para fora da estrutura, por difusão iônica ou por indução do fluxo de água. Como anteriormente citado, quando a lixiviação ocorre, o hidróxido de cálcio é um dos componentes do concreto com maior taxa de dissolução. No entanto, hidróxidos de potássio e sódio podem também apresentar valores representativos para esta taxa, por encontrarem-se normalmente presentes na solução dos poros da pasta. Silicatos de cálcio hidratado e sulfoaluminatos, por sua vez, possuem menor solubilidade. Entretanto, deve-se considerar que quanto maior a quantidade de cálcio incorporado nestes, mais solúveis serão. É fácil induzir, portanto, que a concentração de íons dissolvidos na água que percola através da estrutura apenas irá diminuir quando as paredes dos poros já estiver com uma quantidade suficientemente reduzida de componentes solúveis (EKSTRÖM, 2001).

Enquanto manifestação visual característica deste mecanismo de degradação, é recorrente o aparecimento de eflorescências: crostas brancas que surgem eventualmente na superfície do concreto através da qual a

água que o atravessou sai da estrutura. Estas se formam a partir da associação entre o hidróxido de cálcio dissolvido pela lixiviação ($Ca(OH)_2$) e dióxido de carbono presente na atmosfera (CO_2). A partir da reação entre estas substâncias constituem-se carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e água (H_2O), conforme prevê a Equação 1, proposta por Freitas Jr. (2013). Logo, a eflorescência é essencialmente composta por carbonato de cálcio.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

A referida patologia se desenvolve a princípio com rapidez, reduzindo paulatinamente sua velocidade ao passo que a cal hidratada disponível no meio vai se tornando escassa. Após a hidrólise do hidróxido de cálcio, o caminho para a destruição gradual de outros componentes hidratados da pasta é aberto, visto que silicatos, aluminatos e ferroaluminatos somente são estáveis em sua presença, bem como perante soluções com elevado pH. A medida que a lixiviação se desenvolve, géis desprovidos de resistência e sem propriedade aglomerante se formam nos poros do concreto, conduzindo o mesmo à perda de resistência mecânica (BICZOK, 1972; SZPILMAN, 1994).

São trabalhos nacionais que utilizaram no decorrer de suas pesquisas análises físico-químicas de águas percoladas através de elementos de concreto, no intuito de observar os efeitos da lixiviação no que tange à remoção de compostos deste material, os de Jorge et al. (2001), que realizaram um estudo laboratorial, no qual induzaram a lixiviação por meio da imposição de água deionizada sob pressão em corpos-de-prova moldados, durante quatro meses; de Santi (2008), que procedeu com um estudo de campo na barragem da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ), coletando amostras de água em diversos pontos no interior da estrutura; e de Joukoski et al. (2010), que de forma semelhante recolheram amostras de água no interior de uma barragem, só que neste caso em uma situada na bacia do Rio Iguaçu, no sul do Brasil.

A presente pesquisa partiu também da coleta em campo de amostras de água, neste momento em uma das estruturas que compõem a barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí), conforme descrito no subcapítulo que segue. Este trabalho é parte do estudo desenvolvido por Oliveira (2016), uma das autores deste artigo. Neste, foram verificados diversos efeitos da lixiviação sobre a estrutura estudada, tanto sobre sua resistência e porosidade, quanto no que diz respeito à ocorrência de perda de massa pela mesma.

1.1 Local de realização do estudo

O local selecionado para a realização do presente estudo, devido a identificação neste de intensa formação de eflorescência nas paredes e no piso de um dos trechos de sua galeria de drenagem, foi a Eclusa 1, estrutura componente do Sistema de Transposição de Desnível da barragem onde está instalada a UHE Tucuruí. Este sistema conta, basicamente, com duas eclusas e, entre as mesmas, um canal intermediário, conforme ilustra a Figura 1. A Figura 2, por sua vez, apresenta uma vista geral do barramento da UHE Tucuruí, citando todas as estruturas de concreto que o compõem.

Figura 1 – Vista superior apresentando o posicionamento das Eclusas 1 e 2, bem como do canal intermediário, em relação ao lago da UHE Tucuruí



Fonte: Geris Engenharia e Serviços LTDA, 2008.

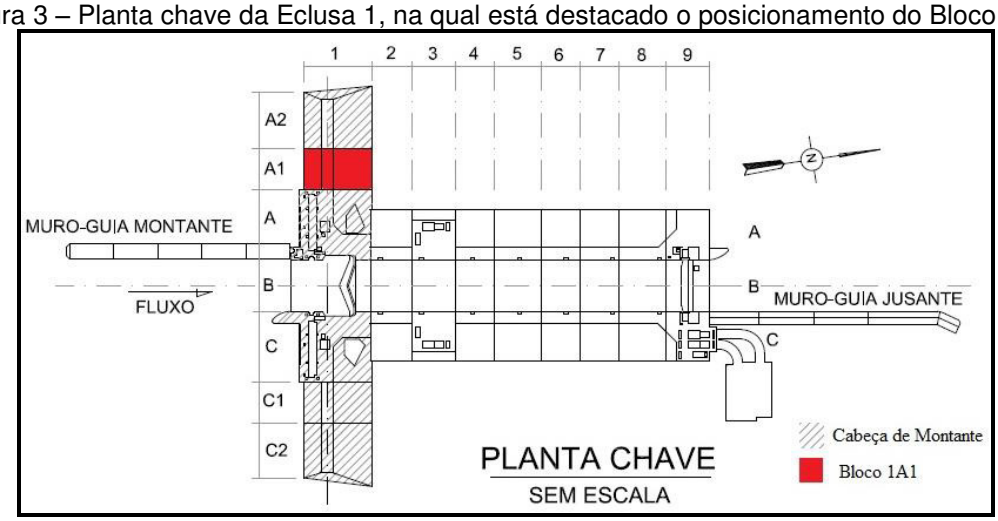
Figura 2 – Barramento da UHE Tucuruí, estando em destaque as estruturas de concreto que o compõem



Fonte: adaptado de Herweg et al., 2004.

Na Eclusa 1, a comum manifestação da lixiviação pôde ser observada ao longo do Bloco 1-A1, disposto como ilustra a Figura 3, por meio de uma planta chave da estrutura, mais especificamente em sua galeria de drenagem, situada à cota 26,50 m. O interior desta galeria, no trecho citado, é mostrado na Figura 4, fazendo-se possível notar as crostas brancas dispostas nas paredes e no piso do local.

Figura 3 – Planta chave da Eclusa 1, na qual está destacado o posicionamento do Bloco 1-A1



Fonte: adaptado de ELETRONORTE (1988).

Figura 4 – Galeria de drenagem do Bloco 1-A1, cota 26,50 m, onde é possível notar a deposição de eflorescências nas paredes e no piso



Fonte: os autores.

1.2 Objetivo da pesquisa

A análise físico-química de amostras da água percolada através de drenos do concreto da estrutura estudada, bem como de amostras da água do reservatório à montante dela (tida como referência), no intuito de identificar diferenças entre elas, notando substâncias que estejam sendo extraídas do concreto ou por ele retidas, é o objetivo norteador do presente trabalho.

2. METODOLOGIA

As coletas de água, visando a realização de análises físico-químicas, foram executadas mensalmente, no intervalo entre junho de 2015 e maio de 2016, com exceção apenas dos meses de novembro, dezembro, fevereiro e abril. Reuniram-se amostras tanto da água do reservatório (ou lago) da UHE Tucuruí, considerada referência por estar em um local "pré-percolação", quanto da água de alguns drenos de maior vazão dispostos no interior da galeria de drenagem, na seção da mesma na qual a patologia foi identificada. As análises físico-químicas destas amostras foram executadas pelo Laboratório de Limnologia e Qualidade da Água da Eletronorte, que se disponibilizou ao apoio à presente pesquisa. A Tabela 1, apresentada na sequência, mostra os parâmetros analisados, bem como a unidade com que foram fornecidos seus resultados e a metodologia empregada para a obtenção destes. Após a referida tabela, encontra-se uma descrição sucinta dos métodos de ensaio nela citados.

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos analisados nas amostras de água, metodologia empregada para sua obtenção e unidade de apresentação de seus resultados

Parâmetro analisado	Metodologia	Unidade
pH	Potenciometria	-
Cor	Espectrofotometria	mg de PtCo/L
Turbidez	Nefelométrico	NTU
Condutividade	Potenciometria	µS/cm
Alcalinidade	Titulação Potenciométrica	mg/L de $CaCO_3$
Ferro Total	Espectrofotometria	mg/L
Cálcio (Ca^{2+})	Titulometria com EDTA	mg/L
Magnésio (Mg^{2+})	Titulometria com EDTA	mg/L
Nitrogênio Amoniacal Ionizado (NH_4^+)	Espectrofotometria	mg/L

Fonte: os autores.

A potenciometria, empregada para a obtenção do pH e da condutividade, é um método de ensaio que se utiliza, na ausência de uma corrente significativa, da mensuração da diferença de potencial elétrico entre amostras líquidas. A espectrofotometria, utilizada para que as concentrações de ferro total e nitrogênio amoniacal ionizado fossem encontradas, serve-se de um equipamento denominado espectrofotômetro para a realização de uma análise óptica através da qual faz-se possível comparar a absorção ou transmissão de radiação entre duas soluções, sendo que uma delas possui quantidade conhecida de substância dissolvida e a outra não. O método nefelométrico, por sua vez, parte da comparação entre a intensidade de luz dispersada em um meio desconhecido e em outro de referência, de modo a determinar sua turbidez, a qual será maior quanto mais elevada for a dispersão da luz no mesmo.

Por fim, a titulometria ou titulação é um método que viabiliza a obtenção da concentração de uma dada solução, a partir da comparação, por análise quantitativa, desta com uma solução padrão, de concentração conhecida. A titulação potenciométrica, aqui utilizada para a determinação da alcalinidade da água, relaciona o potencial de dois eletrodos, um em análise e outro de referência. E a titulometria com EDTA, que permitiu que as concentrações de cálcio e magnésio fossem encontradas, parte do emprego de um ácido que, ao agir como ligante, forma compostos estáveis com íons destes elementos químicos.

No capítulo seguinte, referente aos resultados, será apresentada a diferença, para cada parâmetro analisado, entre a média dos valores obtido para este nas amostras coletadas nos drenos da galeria e aquele encontrado para o mesmo nas amostras de água do lago, em cada mês. Esta diferença permite

identificar quais dentre estes parâmetros sofreu algum acréscimo após a passagem pelo concreto, que é o que mais interessa para o estudo da lixiviação, principalmente no que tange às concentrações dos elementos químicos analisados; e também aqueles que de algum modo acabaram sofrendo redução devido a travessia da água pelo concreto, apresentando por isso um resultado negativo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2, a seguir, mostra para cada um dos meses da pesquisa em que coletas de água puderam ser realizadas, oito no total, bem como para cada parâmetro físico-químico analisado, nove ao todo, o resultado da diferença entre os valores obtidos para um mesmo mês e parâmetro a partir das amostras coletadas no interior da galeria (média dos três drenos considerados) e das amostras do lago à montante da estrutura. Nela, valores negativos indicam que uma dada substância, por exemplo, ficou retida no concreto, como se a água tivesse sido filtrada por este material. Por outro lado, resultados positivos normalmente representam o acréscimo de uma substância, ou de um parâmetro, na água percolada e, portanto, que houve lixiviação do concreto.

Tabela 2 – Diferença entre cada um dos parâmetros físico-químicos identificados na água que deságua no interior da galeria e na água de comparação (do lago), para cada mês da pesquisa, bem como sua média

Mês	pH	Cond. (µS/cm)	Fe Total (mg/L)	Ca^{+2} (mg/L)	Mg^{+2} (mg/L)	NH_4^+ (µg/L)	Turbidez (NTU)	Cor (Pt-Co)	Alcal. (mg/L)
jun/15	4,21	23,90	-	12,88	-0,39	-0,99	-2,67	-49,99	-
jul/15	3,92	27,87	-0,34	13,71	-0,10	5,95	-0,66	-18,43	103,33
ago/15	4,03	640,03	-0,27	47,04	-0,08	2,78	-1,14	-15,37	102,82
set/15	3,84	659,90	-0,19	37,81	0,90	-2,45	-2,46	-20,87	106,71
out/15	3,77	475,75	-	-	-	-8,50	-1,61	-2,69	102,91
jan/16	5,20	611,53	-0,08	49,29	1,02	-121,25	-2,55	-14,75	-
mar/16	3,79	574,98	-0,66	42,29	0,15	-3,78	-6,31	-36,08	-
mai/16	3,72	-	-1,00	46,61	3,51	-32,33	-8,51	-55,53	-
Média	4,06	430,57	-0,42	35,66	0,72	-20,07	-3,24	-26,71	103,94

Fonte: os autores.

Para os oito meses nos quais análises de água foram realizadas, como se pode observar na Tabela 2, houve acréscimo do potencial hidrogeniônico (pH) da água percolada em relação à água do lago, expresso pelos valores positivos demonstrados na coluna referente ao pH. Tal acréscimo pode ser justificado pela ocorrência da hidrólise dos componentes da pasta, que acarreta, entre outras consequências, a redução do pH do concreto, devido à remoção de hidróxidos presentes no mesmo. Ao reduzir o pH do concreto, o da água é elevado, tornando-a alcalina, uma vez que a mesma se torna o meio de transporte para estes hidróxidos. Portanto, o aumento do pH e da alcalinidade nas amostras de água da galeria, também verificada no decorrer das análises químicas, foi proporcional.

Também considerando o que foi mostrado na Tabela 2, nota-se um aumento expressivo da condutividade da água vertida através dos drenos da galeria de drenagem. A condutividade elétrica da água é um indicador da concentração de íons e sais dissolvidos na mesma. Assim, seu aumento apenas reafirma que substâncias têm sido extraídas do concreto.

Em todos os meses em que a concentração de ferro pode ser verificada, a mesma apresentou uma diferença, entre a água percolada e a de referência, negativa. Logo, não há ferro sendo extraído do concreto e, neste momento, vale ressaltar que a estrutura em análise é de concreto massa, não possuindo armadura passível de corrosão no trecho atravessado pelos seus drenos. O ferro, na verdade, têm sido retido no interior do concreto e, portanto, removido da água do lago.

O íon cálcio (Ca^{+2}), de acordo com o que se poderia esperar, considerando outros estudos embasados na avaliação da lixiviação do concreto, obteve uma variação positiva em todos os meses, tendo uma grande concentração sua sido acrescida à composição da água percolada e, portanto, extraída da estrutura. Este fato reforça que os produtos de cálcio presentes na pasta são aqueles mais facilmente solubilizados pela água durante o desenvolvimento da lixiviação.

Quanto aos resultados referentes ao íon magnésio (Mg^{+2}) e a amônia (NH_4^+), pode-se observar pela Tabela 2 tendências variáveis entre os meses de análise, pois em alguns as concentrações destas substâncias apresentou variação positiva e, em outros, negativa. Ambos possuem um comportamento semelhante perante à pasta de cimento, sendo capazes de solubilizar o hidróxido de cálcio presente na mesma, da maneira como demonstram as Equações 2 e 3, que descrevem a reação do íon magnésio e da amônia com o hidróxido de cálcio, respectivamente (SALES et al., 2014).

$$Mg^{+2} + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + Ca^{+2} \quad (2)$$

$$2NH_4^+ + Ca(OH)_2 \rightarrow 2NH_3 + 2H_2O + Ca^{+2} \quad (3)$$

A Equação 2 pode ser utilizada para justificar as ocasiões em que os resultados para os íons magnésio se apresentaram negativos na Tabela 2. Uma vez que, o magnésio que entrou na estrutura, dissolvido na água do reservatório, seguindo a reação demonstrada na referida equação, pode ter se associado ao hidróxido de cálcio, constituindo em seu lugar o hidróxido de magnésio, um produto que, conforme Begonha (2001), é menos solúvel do que o $Ca(OH)_2$. Por outro lado, quando valores positivos aparecem na coluna referente a este íon, entende-se que ele, além de não ter reagido, foi acrescido de mais uma determinada quantidade deste íon, solubilizada a partir da pequena fração de magnésio presente na pasta, devido a impurezas do cimento. Como citado por Mehta e Monteiro (2014), uma fonte de óxido de magnésio (MgO) no cimento é a dolomita, uma impureza recorrente em compostos calcários.

A Equação 3, por sua vez, pode auxiliar na explicação dos valores negativos presentes na coluna referente à amônia, de forma similar a justificativa apresentada para o íon magnésio, representando uma possível reação desta substância com a pasta de cimento. No entanto, há uma diferença: a amônia libera, além de água e cálcio, um gás, o amoníaco (NH_3), que se desloca pelos poros do concreto até atingir o exterior da estrura. Em outro caso, quando os valores encontrados para esta mesma coluna são positivos, além de não ter existido reação entre a amônia e o hidróxido de cálcio, há a possibilidade de que algum pequeno teor de amônia, retido no concreto em um dado momento e proveniente da própria água do reservatório, tenha se desprendido e sido carreado junto à água percolada.

Sabendo-se desta reação que a amônia pode ter com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, liberando, entre outros produtos, íons cálcio, é possível associar duas ocorrências peculiares que simutaneamente se desenvolveram nas amostras coletadas no mês de janeiro: o íon cálcio apresentou sua maior variação positiva, portanto, mais elevada concentração lixiviada neste mês; e a amônia (NH_4^+) demonstrou sua mais expressiva variação negativa. Logo, torna-se possível inferir que existe uma considerável possibilidade de que as reações da amônia com a pasta tenham consumido sua concentração presente na água do reservatório e, por consequência, desencadeando uma maior remoção de íons cálcio do concreto neste período.

No que tange a cor e turbidez, se for considerado que o concreto é um material poroso e que qualquer líquido que passar através do mesmo poderá ser filtrado, em maior ou menor proporção dependendo de suas características, torna-se simples prevêr que, na comparação entre a água que atravessa a estrutura e àquela de referência, estes parâmetros sofreriam redução. Essas propriedades do líquido são visualmente perceptíveis, a água do reservatório tem um tom esverdeado, enquanto que a água que deságua através dos drenos é praticamente incolor, tendo um teor inferior de impurezas. As análises químicas e as variações apresentadas na Tabela 2 vieram apenas para confirmar o previsto, uma vez que os resultados para estes dois parâmetros se mostraram sempre negativos, indicando retenção das partículas suspensas no concreto e uma redução em sua cor e turbidez.

Como observado por meio dos resultados apresentados na Tabela 2, os principais elementos extraídos do concreto foram os íons cálcio, informação notada por sua maior variação de concentração positiva dentre as outras substâncias analisadas. Este resultado corrobora àqueles apresentados por Ekström (2001), Santi (2008) e Joukoski et al. (2010), nos quais as concentrações de cálcio também superaram as dos demais elementos investigados. A pesquisa de Jorge et al. (2001), por sua vez, que partiu da indução em laboratório da lixiviação, cita enquanto substâncias com mais elevados teores na água percolada o sódio e potássio, uma vez que estas estão inevitavelmente presentes nos poros do concreto. No entanto, como eles

também observaram, com o passar do tempo aumentam gradualmente as concentrações de cálcio e sílica nas amostras. Como o presente estudo foi pautado em uma análise em uma estrutura com mais de trinta anos, era previsto que o cálcio seria o elemento químico com maior teor lixiviado, visto que a solução presente em seus poros já foi lixiviada certamente há muito tempo, hipótese esta que foi confirmada.

4. CONCLUSÃO

A lixiviação do concreto desencadeia a remoção de substâncias presentes, principalmente, em sua pasta de cimento, devido simplesmente á percolação de água através deste material, hidrolisando alguns de seus componentes. Através da observação dos resultados a pouco apresentados, pode-se notar que a água que deságua nos drenos da galeria de drenagem encontra-se efetivamente extraindo elementos químicos da estrutura, continuamente.

Em todos os oito meses nos quais fez-se possível realizar coletas de água, tanto do reservatório, quanto dos drenos da galeria de drenagem, bem como as análises físico-químicas de suas amostras, íons cálcio apresentaram um acréscimo expressivo na água percolada em relação a de referência. Notou-se que a alcalinidade da água e, certamente, seu pH, também foram elevados por consequência da passagem através do concreto, evidenciando novamente à remoção e carreamento de substâncias básicas, como os hidróxidos, da pasta de cimento.

O ferro, a cor e a turbidez, por sua vez, sofreram sempre redução em seus valores após atravessar a estrutura, indicando a retenção de substâncias dissolvidas na água do reservatório pelo concreto, o qual funciona como uma espécie de filtro para este líquido. Por fim, as concentrações de íon magnésio e amônia foram as que se mostraram mais variáveis, em alguns meses estas apresentaram variações negativas, deixando aberta a possibilidade de suas concentrações presentes na água do reservatório terem reagido com o hidróxido de cálcio presente na pasta; e em outros, porém, suas variações foram positivas, indicando acréscimo da quantidade destes elementos durante a passagem da água pelo concreto, seja pela dissolução de impurezas presentes no mesmo ou por causa da liberação de substâncias deste tipo retidas na estrutura e advindas da própria água do reservatório.

Os resultados aqui apresentados, com as concentrações de íons cálcio na água percolada superando a de quaisquer outras substâncias, felizmente mostraram-se condizentes com outras pesquisas realizadas com finalidades semelhantes, tanto em estruturas reais quanto em laboratórios, também pautadas na avaliação dos efeitos da lixiviação do concreto.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobras Eletronorte, bem como ao seu Laboratório de Limnologia e Qualidade da Água pelo apoio à presente pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

BEGONHA, A. J. S. **Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto**. Porto: FEUP, 2001.

BICZOK, I. **Corrosión y proteccion del hormigón**. España: Ediciones Urmo, 1972.

CENTRAL PUBLIC WORKS DEPARTMENT – CPWD. **Handbook on repair and rehabilitation of RCC buildings**. New Delhi: Director General Works, 2002.

ELETRONORTE, Centrais Elétricas do Norte do Brasil S. A. **Usina Hidrelétrica Tucuruí - Memória do Empreendimento**. Vol. 2. Brasília, 1988. 359 p.

EKSTRÖM, T. **Leaching of concrete**: Experiments and modelling. Report TVBM-3090. Lund, Lund University, 2001.

FREITAS JR., J.A. **Materiais de construção (TC-031):** Durabilidade do concreto. Material de aula. [Curitiba]: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2013.

GERIS ENGENHARIA E SERVIÇOS LTDA. **Eclusas de Tucuruí:** Conheça um pouco deste empreendimento que você ajuda a construir. [Tucuruí]: GERIS, 2008.

GLASSER, F.P.; MARCHAND, J.M.; SAMSON, E. **Durability of concrete** – degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. Cement and Concrete Research 38, 2008.

HERWEG C. et al. Avanços técnicos aplicados na construção das estruturas de concreto da barragem de Tucuruí, **Conferência Internacional Conjunta ACI – IBRACON em Comemoração dos 100 anos do American Concrete Institute**. São Paulo: IBRACON, 2004. 31 p.

JORGE, M., MAMEDE, F.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Ataque do Concreto Compactado com Rolo por águas puras. **43º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001.

JOUKOSKI, A. et al. Estudo e acompanhamento da perda de massa iônica em barragem de concreto compactado com rolo, em decorrência da percolação de água pela estrutura, **VI Congreso Internacional sobre Patología e Recuperacíon de Estructuras (CINPAR)**. Córdoba (Argentina): CINPAR, 2010.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO P.J.M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2. Ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

OLIVEIRA, T.V. **Estudo da lixiviação em desenvolvimento no concreto da Eclusa 1, estrutura componente do Sistema de Transposição da Barragem de Tucuruí**. Monografia. Tucuruí: Universidade Federal do Pará, 2016.

SALES, A. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: Teoria, controle e métodos de análise. Organização de Daniel Véras Ribeiro. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p.

SANTI, M.R.A. **Metodologia para avaliação da perda de massa em barragem de Concreto Compactado com Rolo (CCR)**. Dissertação. Curitiba: UFPR, 2008.

SICAKOVA, A.; ESTOKOVA, A. **Some aspects of study the leaching and acid corrosion of concrete**. International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, V.8, n. 5, 2014.

SZPILMAN, A. et al. Avaliação dos efeitos de lixiviação da cal no concreto de enchimento da fundação da casa de força de Itaipu, **XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens**. V. 2. Tema III. Rio de Janeiro: CBDB, 1994.