Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DA CARBONATAÇÃO E DO DESGASTE SUPERFICIAL DO CONCRETO: UM ESTUDO DE CASO REALIZADO NA ECLUSA 1 DO SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DE DESNÍVEL DA BARRAGEM DE TUCURUÍ

T. OLIVEIRA
Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal do Pará
Pará; Brasil
thaisvaladares.94@gmail.com

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

RESUMO

O concreto é um material normalmente exposto a mecanismos de deterioração, capazes de reduzir sua vida útil. Dentre eles, faz-se possível citar uma patologia largamente difundida, a carbonatação. Esta é uma reação natural em estruturas de concreto, decorrente da absorção por este material do dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. Índices moderados de carbonatação podem ser benéficos ao concreto. No entanto, ela provoca a neutralização dos álcalis do cimento, reduzindo o potencial hidrogeniónico (ph) deste material, e a despassivação da armadura (quando presente). Foi objeto deste estudo a Eclusa 1, componente do Sistema de Transposição de Desnível da Barragem de Tucuruí, cujo concreto tem, em média, 33 anos. Sendo uma obra hidráulica, o concreto está inevitavelmente exposto a alternância de cheias e estiagens, obtendo-se como produto o desgaste superficial do mesmo e a consequente exposição dos agregados. A este trabalho interessa a análise dos processos citados, a carbonatação e o desgaste superficial do concreto, bem como sua inter-relação. Foram extraídos onze testemunhos do paramento, em três faixas horizontais pré-estabelecidas, uma delas acima da cota máxima do nível d'água: referência para a pesquisa. Foram verificados a profundidade de carbonatação e o desgaste superficial, medido considerando o afastamento entre o cume dos maiores agregados expostos e a base argamassada. Observou-se que a profundidade de carbonatação nos testemunhos de referência foi maior, em contrapartida, seu desgaste superficial era praticamente nulo. Por outro lado, aqueles extraídos nas faixas estabelecidas abaixo do nível d'água apresentaram resultados inversos.
Palavras-chave: carbonatação, desgaste, eclusa.

ABSTRACT

Concrete is a material normally exposed to deterioration mechanisms, able to shorten its life. Among them, it is possible to mention a widespread pathology, the carbonation. This is a natural reaction in concrete structures that occur due to the absorption of carbon dioxide (CO_2) present in the atmosphere by this material. Moderate carbonation indexes can be beneficial to concrete. However, it causes the neutralization of the cement alkalis, reducing the hydrogenionic potential of this material, and the depassivation of the reinforcement (when present). The object of this study was the Lock 1, component of the Transposition System of Tucuruí Dam, which concrete has on average 33 years. Being a hydraulic work, the concrete is inevitably exposed to alternating floods and droughts, obtaining, as product, the wear of its surface and the consequent exposure of aggregates. To this work concerns the analysis of the aforementioned processes, carbonation and surface wear of the concrete, as well as their interrelationship. Eleven testimony of the vestments were extracted in three pre-established horizontal bands, one above the maximum level of the water: reference for research. The depth of carbonation and surface wear were recorded, that last one considering the measured distance between the summit of the larger aggregates and the exposed base grouted. It was observed that the carbonation depth in the reference testimonies was larger, however, its surface wear was almost null. Moreover, those extracted in the ranges stated below water level showed opposite results.
Keywords: carbonation, wear, lock.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

A 300 Km em linha reta ao sul de Belém, no estado do Pará, foi construída uma barragem no rio Tocantins, nas proximidades da cidade de Tucuruí, e nela foram implantadas a Usina Hidroelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí) e seu Sistema de Transposição de Desnível.

A UHE Tucuruí foi construída visando à geração de energia elétrica. Já o Sistema de Transposição de Desnível de Tucuruí, formado por duas eclusas e dois canais, é parte da projetada Hidrovia Araguaia-Tocantins e tem a função de permitir que embarcações atravessem o desnível criado pela barragem. Tanto a construção da UHE, quanto a do Sistema de Transposição foi realizada em duas etapas sucessivas [1].

Na primeira etapa, entre 1975 e 1992, foi concluído o barramento do rio Tocantins, construídos o vertedouro e a Casa de Força 1, onde foram instaladas doze máquinas de 350MW, sendo que a primeira unidade geradora entrou em operação em 1984. Na segunda etapa, entre 1998 e 2006, foi construída a Casa de Força 2 e nela instaladas mais onze unidades geradoras de 375MW, totalizando 8370MW de capacidade instalada [1].

A Eclusa 1 está localizada na barragem de terra, fato que interferiu no programa de enchimento do lago, levando a necessidade de edificar sua cabeça de montante na 1ª etapa de construção, entre os anos de 1982 e 1984. A partir daí, o ritmo de obra foi diminuindo até a sua completa paralisação em 1989. As obras foram retomadas em 1999 e após sucessivas paralisações e retomadas, foram finalmente concluídas em 2010 [2]. A localização da Eclusa 1 em relação ao complexo da barragem de Tucuruí pode ser observada na **Figura 1**.



Figura 1: Vista aérea do barramento do rio Tocantins, destacando as principais estruturas de concreto que o compõe [1]

O volume total de concreto aplicado nas duas etapas de construção da barragem foi de aproximadamente 8.000.000 m³ (oito milhões de metros cúbicos), aos quais se somaram os aproximadamente 1.200.000 m³ (um milhão e duzentos mil metros cúbicos) de concreto do Sistema de Transposição de Desnível. A eclusa de montante (Eclusa 1) é constituída por uma câmara de 210 m de comprimento e 33 m de largura. Tem a finalidade de fazer a ligação entre o reservatório e o canal intermediário. Nela foi consumido um volume de aproximadamente 736.000,00 m³ (setecentos e trinta e seis mil metros cúbicos) de concreto, sendo aplicados 410.000,00 m³ (quatrocentos e dez mil metros cúbicos) na 1ª etapa e o restante na 2ª etapa [2].

Como objeto de estudo desta pesquisa foi escolhido o paramento de montante do Muro de Ligação Esquerdo, bloco 1A1 da Eclusa 1 (**Figura 2**). Os critérios considerados para esta decisão foram: 1) o fácil acesso por pessoal autorizado ao local, não estando inserido em área restrita ou de elevada periculosidade – ele não pertence ao SEP (Sistema Elétrico de Potencia) e não possui equipamentos eletromecânicos ligados à geração; 2) o pioneirismo dos materiais e dos métodos construtivos adotados – foi a primeira estrutura permanente no Brasil a receber Concreto Compactado a Rolo, em 1982;

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

3) o tempo de operação (31 anos); e 4) os seus dados históricos (banco de informações). Valendo salientar que a barragem não apresenta nenhuma sinalização de comprometimento a sua segurança e vida útil.



Figura 2: Eclusa 1 do Sistema de Transposição de Desnível de Tucuruí, observada de jusante para montante

A Eclusa 1 está localizada de tal forma que o eixo da Barragem de Terra passa por sua cabeça de montante. Sendo ela, portanto, uma estrutura de gravidade, integrada à barragem e não armada. A conexão entre ambas é feita por Muros de Ligação (Blocos 1A1, 1A2, 1C1 e 1C2).

Um dos aspectos mais importantes da tecnologia do concreto é o seu comportamento perante a ação de agentes agressivos. Algumas substâncias químicas são capazes de provocar a deterioração do concreto, podendo comprometer a utilização da estrutura. No entanto, para que isso ocorra, essas substâncias devem se encontrar em estado eletroliticamente ionizado, isto é, dispersas em meio líquido que permita sua dissociação [3].

Os agentes agressivos podem exercer ações de natureza física ou química: as de natureza física são caracterizadas por fenômenos de abrasão e lixiviação atuando sobre a estrutura de concreto; e as de natureza química, por sua vez, são decorrentes do intercâmbio de íons em meio aquoso, dando origem a compostos solúveis e insolúveis responsáveis pela geração de tensões capazes de desagregar o concreto [3].

Quando o contexto é a qualidade do concreto, geralmente há uma preocupação imediata em relação à sua resistência, esquecendo-se muitas vezes do fator fundamental, a durabilidade. Essencial especialmente em obras hidráulicas, onde o emprego de concreto é massivo.

Conforme conceito presente na literatura, "*a durabilidade do concreto é definida como sua capacidade de resistir a ações das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração*" [4]. Dependendo das condições climáticas e ambientais, o concreto está submetido aos efeitos de um conjunto de agentes agressivos e de diferentes fatores destrutivos, que podem atuar de maneira isolada, associando-se a cada um deles efeitos característicos. O resultado das interações ambientais com a microestrutura do concreto é a mudança de suas propriedades.

Em relação à exposição ao meio, à superfície do paramento de montante do corpo da barragem de uma usina hidroelétrica pode ser dividida em três zonas distintas, quais sejam:

- **Zona submersa** - A maior fração esta quase sempre submersa, ou seja, em contato constante com a água do reservatório. Estas águas podem conter vários componentes agressivos ao concreto, tais como: resíduos provenientes de indústrias instaladas às margens do reservatório; defensivos agrícolas de plantações; matéria-orgânica proveniente da decomposição da vegetação existente no local antes do enchimento do reservatório; além da própria água do manancial;

- **Zona acima do nível máximo** - Uma parcela da superfície do paramento encontra-se acima do nível máximo do reservatório. Portanto, em contato constante com os gases atmosféricos e sujeita aos meios de degradação relacionados a estes, como é o caso da carbonatação;

- **Zona entre o mínimo e o máximo operacionais** – A terceira parcela do paramento encontra-se hora submersa e hora exposta ao ar. Esta superfície, quando submersa, esta em contato com a água do reservatório e seus agentes agressivos; já quando o nível do reservatório baixa ela passa a estar exposta ao ar e, consequentemente, a carbonatação. Porém, os mecanismos de degradação não ocorrem isoladamente, nem simplesmente se somam, eles operam em conjunto, cada um a seu tempo, de modo que esta zona esta sujeita a uma forma singular de agressão.

Em virtude de sua peculiar característica, a superfície objeto deste estudo está contida na zona entre o mínimo e o máximo operacionais. Neste caso, como os níveis de montante da Eclusa 1 são os do reservatório, o máximo normal é a cota 74,00 m e mínimo, a cota 58,00 m – cotas em relação ao nível do mar. Portanto, o presente estudo esteve concentrado no desgaste superficial do concreto do paramento de montante do bloco 1A1 da Eclusa 1 entre as cotas 74,00m e 58,00m. A localização deste bloco em relação a estrutura como um todo esta ilustrada na **Figura 3**.

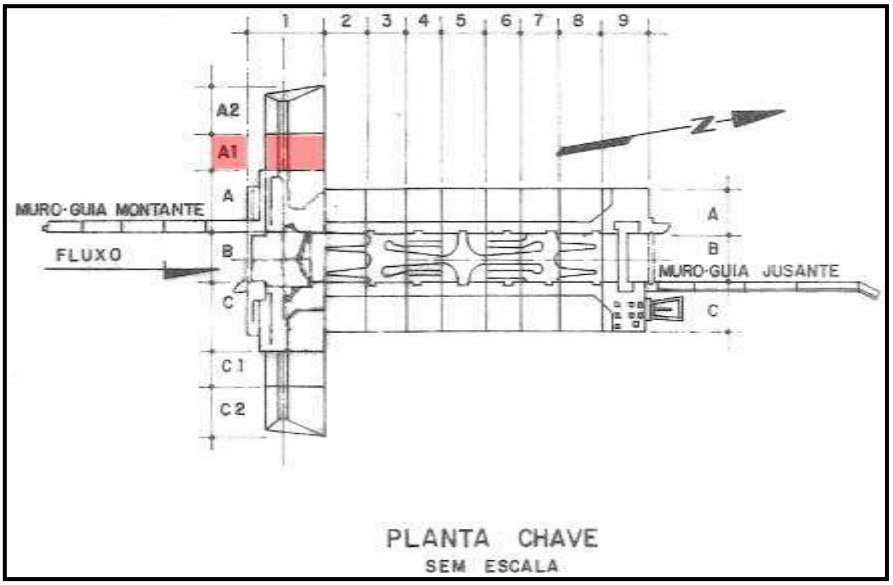

Figura 3: Planta chave da Eclusa, sem escala, evidenciando a localização do bloco 1 – A1 [2]

Hoje, 31 anos após o enchimento do reservatório, a superfície de concreto do paramento estudado apresenta aspecto áspero, com os agregados expostos. Logo, a camada de argamassa que no momento da concretagem criava uma película entre o agregado e a fôrma deteriorou-se, como pode ser observado na **Figura 4**. A quantificação deste desgaste e a investigação de suas causas foram estudadas e os resultados serão apresentados no decorrer deste artigo.



Figura 4: Foto ilustrando o desgaste superficial do paramento de montante da Eclusa 1

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A carbonatação é definida como um processo físico-químico que progride lentamente no interior das estruturas de concreto pela penetração do dióxido de carbono (CO_2), a partir da superfície externa para a interna. Ela ocorre naturalmente, dependendo apenas da concentração deste gás na atmosfera e da variação de umidade no local analisado. O avanço da frente de carbonatação está diretamente atrelado à facilidade que o CO_2 encontra para se difundir através da camada de cobrimento do concreto em um intervalo de tempo. A penetração de CO_2 é regulada pelos mecanismos de transporte e se dá pela difusão de gases por entre os poros e fissuras. Dessa forma, a estrutura dos poros e a configuração das fissuras, bem como a umidade presente nos vazios são fatores determinantes para o ingresso do CO_2 no interior da matriz cimentícia [4].

O CO_2 é capaz de se combinar com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) presente na pasta de cimento, dentre outros produtos envolvidos no processo de hidratação, resultando em compostos como o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Basicamente, a reação se desenvolve como demonstrado na **Equação 1** [5].

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

A camada superficial do concreto quando carbonatada tem aumentada sua resistência mecânica e reduzida sua permeabilidade, devido à baixa solubilidade do $CaCO_3$ em água. Porém, em águas com elevadas taxas de CO_2, há a formação de ácido carbônico (H_2CO_3), advindo da associação entre a água (H_2O) e o dióxido de carbono dissolvido (CO_2) (**Equação 2**), que gradualmente dissolve a camada carbonatada, formando bicarbonatos solúveis (como exemplo o bicarbonato de cálcio - $Ca(HCO_3)_2$), conforme descrito pela **Equação 3**. A este processo chamamos de difusão do carbonato de cálcio ($CaCO_3$ – insolúvel) devido ao ataque do ácido carbônico (H_2CO_3) [6].

$$H_2O + CO_2 \longrightarrow H_2CO_3 \quad (2)$$

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \longrightarrow Ca(HCO_3)_2 \quad (3)$$

A presença do ácido carbônico promove uma diminuição de pH no sistema, que se torna incapaz de manter o pH elevado, em função dos íons H+ presentes, do C-S-H e dos componentes anidros (fases C3S ou C2S) remanescentes na pasta de cimento que se dissociam na forma de sílica amorfa. Como resultado, o concreto passa a se comportar como um material altamente poroso e frágil. Assim sendo, elevados níveis de carbonatação podem resultar em perda da integridade estrutural do material [6].

Como a superfície da água se encontra em movimento, o bicarbonato dissolvido é removido, abrindo caminho para que a reação continue se repetindo, deixando expostos os produtos finais não cimentícios em forma de géis de hidróxido de silício, alumínio e ferro, com inclusões de grãos de agregados. A **Equação 4** ilustra a repetição do processo, quando o hidróxido de cálcio é novamente atacado pelo ácido carbônico. A **Equação 5**, por sua vez, mostra este mesmo composto sendo atacado pelo bicarbonato de cálcio, formado como descrito anteriormente na **Equação 2**.

$$2H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca(HCO3)_2 + 2H_2O \quad (4)$$

$$Ca(HCO)_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O \quad (5)$$

Embora a camada atacada possa ser muito fraca, ainda tem certa resistência de difusão o que retarda a degradação. Porém, quando a camada enfraquecida se separa do concreto (por erosão ou fragmentação), a taxa é ampliada. Daí, o CO_2 penetra para o interior da estrutura novamente, reage com o hidróxido de cálcio e o difunde para o exterior, formando novos $CaCO_3$ e deixando a superfície desgastada [6]. Este processo é gradual, continuo e retroalimentado, contribuindo de maneira significativa com a degradação do bloco estudado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução deste trabalho fez-se necessário realizar ensaio destrutivo no paramento da Eclusa 1, de modo a verificar a profundidade de penetração da carbonatação. O referido ensaio consistiu na extração de onze corpos de prova de concreto do paramento de montante do muro de ligação, com o auxílio de uma máquina extratora, marca EMIC, provida de coroa e cálice diamantado, com 100 mm de diâmetro, seguindo as recomendações da NBR 7680-1 [7], conforme possível.

Segundo esta norma, o ideal seria extrair testemunhos que se igualassem ou excedessem três vezes o Diâmetro Máximo Característico (DMC) do agregado do concreto analisado. Neste caso, o DMC é igual a 76 mm, o que exigiria extrações

de pelo menos 228 mm de diâmetro. Esta recomendação não pode ser seguida, devido à indisponibilidade de uma extratora com broca de tais dimensões.

Com os testemunhos extraídos foi possível ainda avaliar, empiricamente, o desgaste superficial do paramento. Partindo da comparação entre aqueles extraídos acima do nível máximo d'água (cota 74,00 m) – utilizados neste trabalho como referência –, cuja faixa de extração foi denominada "topo", e daqueles extraídos abaixo deste, em duas faixas distintas, chamadas "meio" e "fundo". Os pontos de extração e suas respectivas faixas de domínio estão demonstrados em uma planta esquemática, presente na **Figura 5**.

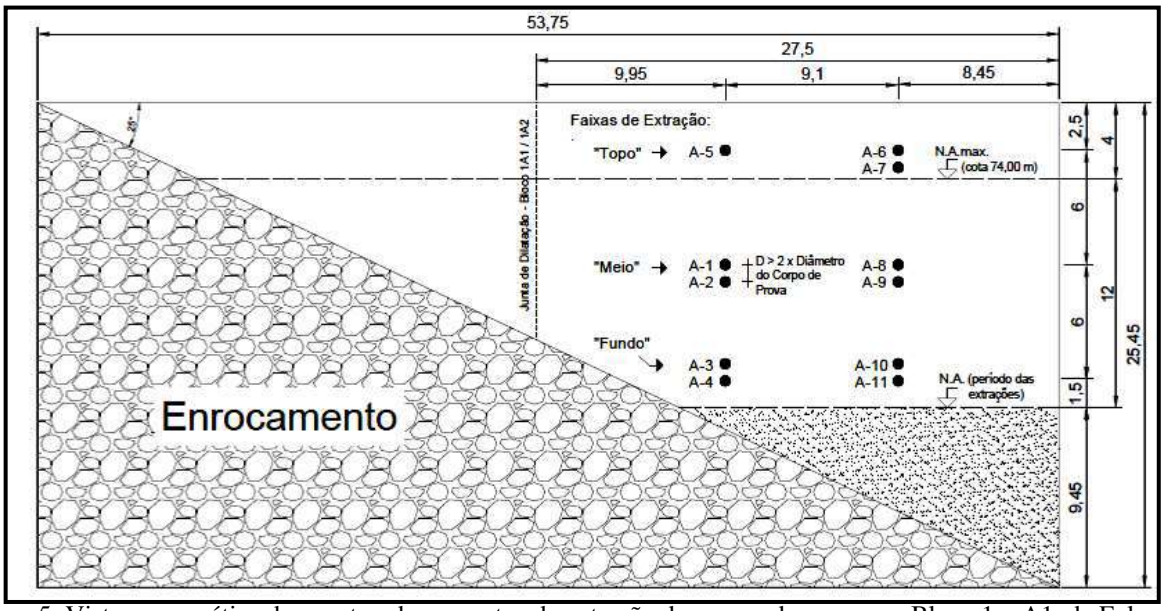

Figura 5: Vista esquemática demonstrando os pontos de extração de corpos de prova, no Bloco 1 – A1, da Eclusa 1

Os corpos de prova foram extraídos em novembro de 2015. Para a execução deste procedimento, foi essencial a ajuda de um guindaste permitindo descer no paramento e posicionar a extratora próxima a vertical. A mesma foi fixada no paredão de concreto com o auxílio de chapas de aço e chumbadores parabolt. A **Figura 6** ilustra as medidas adotadas para a extração dos testemunhos, conforme descrito.

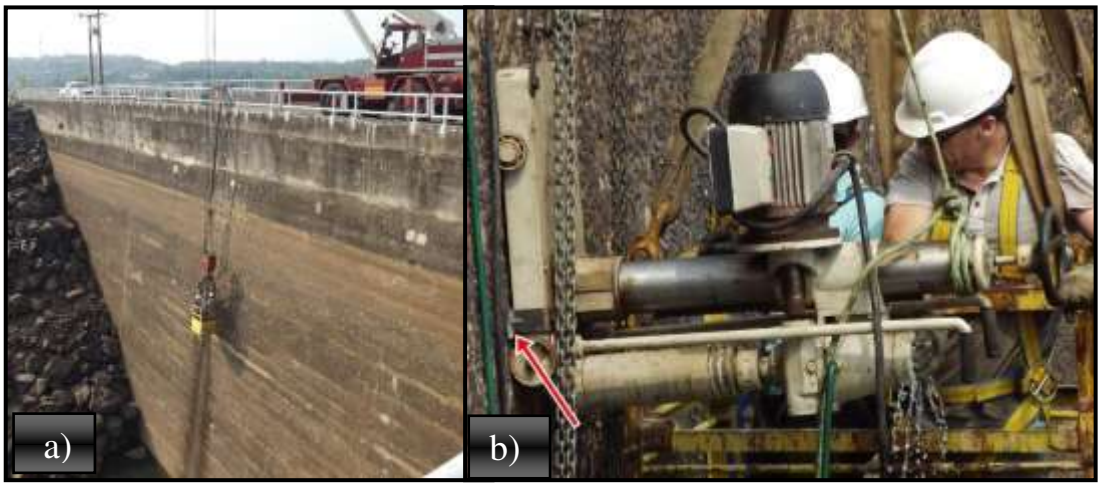

Figura 6: a) Gaiola sustentada pelo guindaste durante o posicionamento e manipulação da extratora; b) Extração de testemunhos do paramento, destacando a fixação da extratora

Após a extração, cada corpo de prova recebeu borrifadas de solução de fenolftaleína, um indicador ácido-base comumente utilizado, preparado na proporção de 1% de fenolftaleína dissolvida em 99% de álcool etílico. Esta foi aplicada de modo a verificar a profundidade de penetração da carbonatação. Como é possível observar na **Figura 7**, após a aplicação da solução, uma região não sofre mudança de cor, indicando que possui ph abaixo de 8,5. Portanto,

constatando a presença da carbonatação. Enquanto isso, a outra área do testemunho adota coloração rosada, demonstrando que se encontra com ph elevado, de caráter básico, como o concreto normalmente se apresenta, com ph em torno de 12,5.



Figura 7: Forma como o corpo de prova se apresenta após ser submetido à solução de fenolftaleína. A seta indica a região carbonatada, que manteve sua cor original

Para quantificar a profundidade de penetração, contou-se com o auxílio de um paquímetro, marca Mitutoyo, modelo CD-8'' CS-B. A distância da extremidade externa do corpo de prova até a linha limítrofe entre a região rosada e a que manteve sua coloração original – não carbonatada e carbonatada, respectivamente – foi medida, considerando quatro pontos equidistantes marcados na base do corpo de prova, como pode ser observado na **Figura 8**.

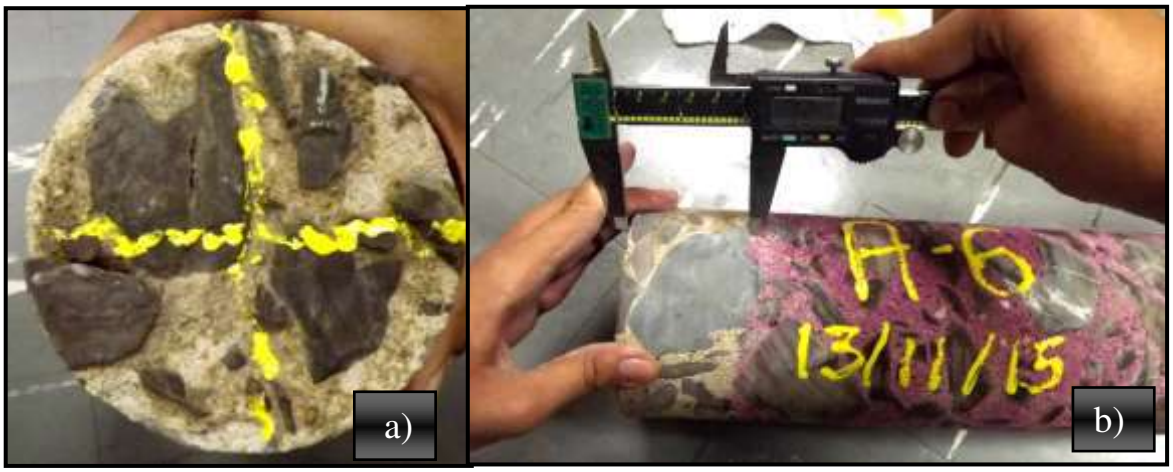

Figura 8: Procedimento de medição da profundidade de penetração da carbonatação, sendo: a) a marcação dos pontos equidistantes para a realização das leituras; b) medição com o auxílio do paquímetro

Quanto ao desgaste superficial, sua extensão foi mensurada empiricamente, também fazendo uso do paquímetro e em quatro pontos equidistantes, a partir da medição da distância entre o cume do maior agregado exposto e a base argamassada, utilizando como referência os testemunhos extraídos acima do nível d'água (A-5, A-6 e A-7), adotados como pouco ou não desgastados. A **Figura 9** ilustra os procedimentos adotados para a medição do desgaste superficial dos corpos de prova extraídos.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

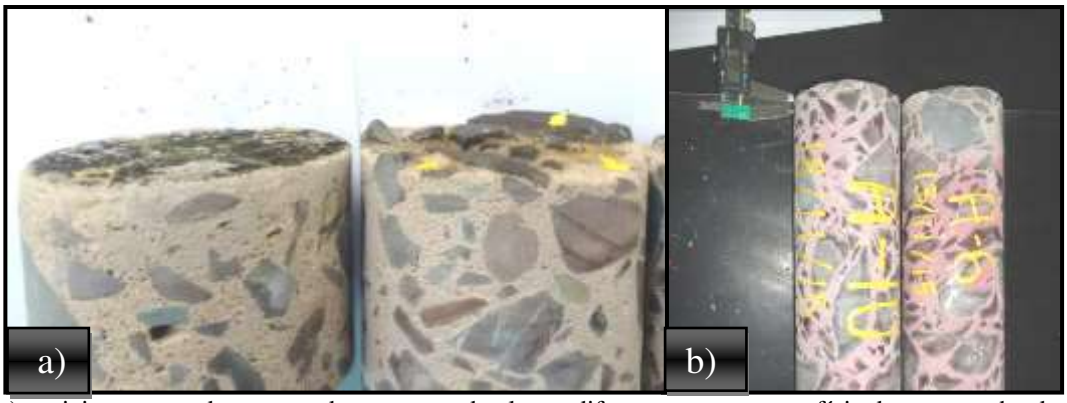

Figura 9: a) posicionamento dos corpos de prova, sendo clara a diferença entre a superfície do testemunho de referência, a esquerda, e o analisado quanto ao desgaste, a direita; b) medição da extensão desgastada, com auxílio de paquímetro e uma régua metálica, servindo de ponte de referência entre as amostras

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos para a profundidade de penetração da carbonatação nos testemunhos de concreto extraídos estão demonstrados na **Tabela 1**, onde se encontram frisadas ainda as faixas de profundidade as quais eles pertencem.

Tabela 1 – Resultados obtidos para a profundidade de penetração da carbonatação

Amostra	Data de extração	Faixa de profundidade	Profundidade de penetração da carbonatação (mm)				
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	*Média*
A-1	12/11/2015	Meio	14,58	14,52	12,10	24,05	*16,31*
A-2	12/11/2015	Meio	26,74	37,45	10,85	30,96	*26,50*
A-3	12/11/2015	Fundo	11,43	13,48	11,23	13,89	*12,51*
A-4	13/11/2015	Fundo	19,85	17,99	29,09	25,83	*23,19*
A-5	13/11/2015	Topo	102,59	106,12	105,31	105,31	*104,83*
A-6	13/11/2015	Topo	52,40	49,55	52,85	47,98	*50,70*
A-7	13/11/2015	Topo	55,44	57,50	50,21	52,89	*54,01*
A-8	16/11/2015	Meio	26,57	39,52	25,12	9,51	*25,18*
A-9	16/11/2015	Meio	22,28	25,79	11,24	24,70	*21,00*
A-10	18/11/2015	Fundo	18,40	10,96	10,24	10,35	*12,49*
A-11	18/11/2015	Fundo	16,73	13,43	14,23	18,38	*15,69*

Como se pode notar pela análise da Tabela 1, todas as amostras, sem exceção, apresentam-se carbonatadas, ainda que em diferentes proporções. Isto evidencia o quanto a carbonatação é uma reação normal para estruturas de concreto, principalmente para aquelas de idade mais avançada, como a estudada (o paramento foi concretado há 33 anos).

É clara a diferença entre os resultados observados para os testemunhos de referência (topo) e aqueles advindos das faixas "meio" e "fundo". Os testemunhos extraídos da faixa de profundidade "topo" foram os que apresentaram maiores valores para a carbonatação, fato que pode ser justificado pela maior exposição desta região, ao longo de todo o ano, ao ar atmosférico, estando mais propensa a absorção dos gases do meio, entre eles o CO_2, causador da reação.

Por outro lado, os resultados das faixas "meio" e "fundo" demonstraram valores mais tímidos de carbonatação, não superando a metade daqueles obtidos para a faixa de referência. Ambas as faixas seguiram basicamente a mesma proporção, isso porque em grande parte do ano elas ficam submersas, sem contato com o CO_2 atmosférico, estando submetidas, no máximo, aquele dissolvido na água. A faixa de profundidade "fundo" obteve resultados um pouco inferiores ao da faixa "meio", o que se justifica pelo período em que as extrações foram executadas, pouco após sua exposição ao ar atmosférico, quando esta outra faixa já se encontrava exposta há algum tempo.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Como citado no capítulo anterior, foram utilizados testemunhos cujas dimensões não satisfazem as recomendações da norma. No entanto, tal fato não interferiu significativamente nos resultados deste ensaio, uma vez que o foco do estudo é a análise da profundidade de carbonatação no concreto do paramento, não a verificação da resistência à compressão dos testemunhos, objeto da norma citada. Logo, o diâmetro de 100 mm foi suficiente.
Em caráter ilustrativo, a **Figura 10** apresenta três gráficos, um para cada faixa analisada, demonstrando seus valores de profundidade de penetração da carbonatação. Conforme será possível notar por meio dela, a amostra A-5 se mostrou uma exceção, com valores em muito superiores aos demais da mesma faixa. Este acontecimento pode ser justificado por alguma fissuração ou falha de concretagem local, que acabou por ampliar a exposição desta região a mecanismos de deterioração, como a carbonatação.

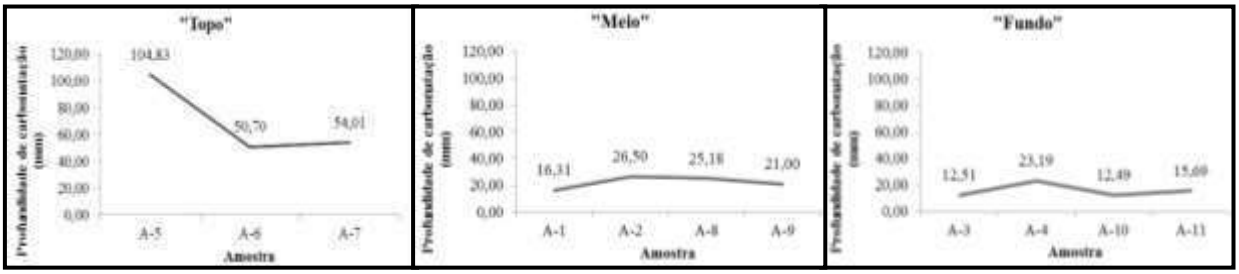

Figura 10: Gráficos ilustrando a profundidade de carbonatação nas faixas "topo", "meio" e "fundo", respectivamente

A **Tabela 2**, a seguir, apresenta os resultados obtidos para o desgaste superficial dos testemunhos. Sendo as amostras A-5, A-6 e A-7 utilizadas como referência em sua mensuração, seu desgaste foi considerado, por aproximação, nulo.

Tabela 2 – Resultados obtidos para o desgaste superficial

Amostra	Data de extração	Faixa de profundidade	Desgaste Superficial (mm)				
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	*Média*
A-1	12/11/2015	Meio	5,93	5,48	8,12	4,39	*5,98*
A-2	12/11/2015	Meio	10,68	8,41	2,87	7,59	*7,39*
A-3	12/11/2015	Fundo	3,17	4,46	7,72	7,14	*5,62*
A-4	13/11/2015	Fundo	3,85	6,13	9,63	5,89	*6,38*
A-5	13/11/2015	Topo	-	-	-	-	-
A-6	13/11/2015	Topo	-	-	-	-	-
A-7	13/11/2015	Topo	-	-	-	-	-
A-8	16/11/2015	Meio	10,73	5,61	6,67	7,60	*7,65*
A-9	16/11/2015	Meio	5,45	4,50	5,07	4,29	*4,83*
A-10	18/11/2015	Fundo	8,56	7,91	5,29	6,52	*7,07*
A-11	18/11/2015	Fundo	2,62	2,68	5,85	5,84	*4,25*

Observando a média dos valores alcançados para o desgaste superficial, eles não seguem uma regra, variando aleatoriamente de acordo com o ponto de extração. São resultados próximos, variando do maior (7,65 mm) para o menor (4,25 mm) em apenas 3,4 mm.

O fato de todas as amostras extraídas abaixo do nível máximo d'água possuírem algum desgaste superficial evidencia a homogeneidade deste processo de deterioração em toda a região compreendida na zona entre o mínimo e máximo operacionais. Como descrito anteriormente, o desgaste advém da formação de ácido carbônico (H_2CO_3) na água do reservatório, devido à presença de CO_2. Este composto dissolve a camada carbonatada a cada ciclo de cheia e estiagem, provocando a erosão superficial da pasta de cimento e deixando exposto o cume dos agregados.

Ainda que se trate de um mecanismo de deterioração do material, se for considerada a idade do concreto (33 anos) e o período ao qual se encontra exposto às variações do nível d'água do reservatório (31 anos), um desgaste de 10,73 mm (maior valor encontrado, independente de médias) é muito pequeno se comparado à extensão do maciço. Ao adotar uma largura média de 20 m entre o paramento de montante e o de jusante do muro de ligação, tem-se um desgaste que representa 0,05% desta dimensão, não caracterizando qualquer risco a sua integridade estrutural.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

4. CONCLUSÃO

Com a realização do presente estudo constatou-se o desenvolvimento da carbonatação em todas as regiões analisadas, estando tanto a zona acima do máximo operacional, quanto a zona entre o mínimo e o máximo operacionais do paramento do muro de ligação da Eclusa 1 expostos a este mecanismo de deterioração. A primeira zona citada foi a que apresentou valores mais expressivos de profundidade de penetração de carbonatação, evidenciando sua maior exposição ao ar atmosférico.

Quanto à análise do desgaste superficial, a zona acima do máximo operacional, chamada durante as extrações de faixa "topo", foi a mais integra superficialmente, sendo considerada referência para as amostras das demais faixas. Estas outras, distribuídas na zona entre o mínimo e máximo operacionais, apresentaram todas desgaste superficial e, consequentemente, exposição de agregados. Fato não alarmante, por se tratar de uma erosão muito pequena perante a extensão do maciço, na ordem de 0,05% de sua largura.

Assim, ainda que constatada a ocorrência dos dois mecanismos de deterioração analisados, validando a execução do estudo, a estrutura não é julgada comprometida. Pelo contrário, considerando seus 33 anos em operação, o concreto do paramento de montante do muro de ligação da Eclusa 1 se apresenta extremamente íntegro, dispensando intervenções em curto prazo.

5. AGRADECIMENTOS

A Eletrobras Eletronorte, pelo apoio a pesquisa, permitindo o acesso pleno a estrutura da Eclusa 1, além de fornecer os equipamentos necessários ao desenvolvimento do estudo, incluindo desde o guindaste, extratora, paquímetro e tantos outros materiais e documentos indispensáveis para a avaliação do problema.

6. REFERÊNCIAS

[1] Herweg, C. *et al.* "Avanços técnicos aplicados na construção das estruturas de concreto da Barragem de Tucuruí". In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL CONJUNTA ACI – IBRACON COMEMORAÇÃO DOS 100 ANOS DO AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, São Paulo: Ibracon/Aci, 2004. 31 p.

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

[3] FURNAS, Equipe do Laboratório de Concreto – *Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo – Ensaios e Propriedade*. São Paulo, 1997. pp. 1-3, cap. 18.

[4] Papadakis, V.G.; Vayenas, C.G.; Fardis, M.N. "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation". *ACI Materials Journal*, 1991, n.º 88, pp. 363-373.

[5] Ribeiro, D.V. *Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise*. Elsevier, 2013, cap. 3.

[6] Ekström, T. *Leaching of Concrete: Experiments and Modelling.* Suécia: Laund University, 2001. 229 p. Report TVBM- 7153 (Ekström 2000).

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7680-1: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – parte 1: Resistência à compressão axial*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 27 p.