



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

THAIS VALADARES OLIVEIRA

**ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO NO  
CONCRETO DA ECLUSA 1, ESTRUTURA COMPONENTE DO  
SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DA BARRAGEM DE TUCURUÍ**

TUCURUÍ – PA

2016

THAIS VALADARES OLIVEIRA

**ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO NO  
CONCRETO DA ECLUSA 1, ESTRUTURA COMPONENTE DO  
SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DA BARRAGEM DE TUCURUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos necessários a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Civil, na Faculdade de Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira.

TUCURUÍ – PA

2016

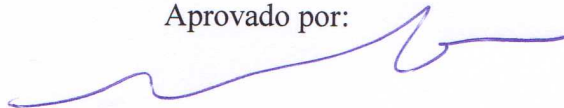
THAIS VALADARES OLIVEIRA

**ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO NO  
CONCRETO DA ECLUSA 1, ESTRUTURA COMPONENTE DO  
SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DA BARRAGEM DE TUCURUÍ**

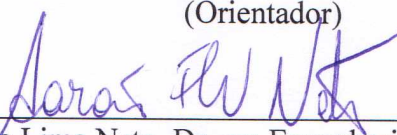
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos necessários a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Civil, na Faculdade de Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Pará.

Tucuruí, 27 de junho de 2016.

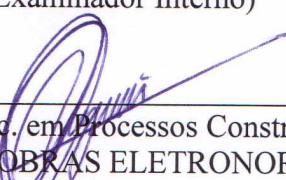
Aprovado por:



\_\_\_\_\_  
Marcelo Rassy Teixeira, Dr. em Engenharia de Estruturas (UFPA)  
(Orientador)



\_\_\_\_\_  
Aarão Ferreira Lima Neto, Dr. em Engenharia de Estruturas (UFPA)  
(Examinador Interno)



\_\_\_\_\_  
André Alessandro Nogueira, MSc. em Processos Construtivos e Saneamento Urbano  
(ELETROBRAS ELETRONORTE)  
(Examinador Externo)

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem eles nada disso teria sido possível. Silvestre e Adriana, a vocês meu amor e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou até aqui e me mostrou o quanto suas escolhas são sempre melhores que as nossas. Só Ele sabe onde eu quis estar e só eu sei onde ele me trouxe. Obrigada Senhor, por tudo que fizestes, fazes e ainda há de fazer por mim.

Aos meus pais, que me incentivaram a encarar meus medos e chegar aqui de cabeça erguida. A eles, que jamais duvidaram das minhas capacidades e me concederam todo apoio emocional, psicológico e, claro, financeiro nos anos decorridos do curso, bem como em toda a minha vida até aqui.

À minha família, incluindo irmão, cunhada, sobrinhos, avó, tias, tios, primos, primas, padrinho, madrinha e todos os demais, bem como ao meu namorado, Cleyton L. Sousa, e sua família. Obrigada pelo apoio, companhia e incentivo a continuidade nesta batalha que é a graduação em engenharia.

Aos professores que estiveram presentes em minha caminhada acadêmica, favorecendo o meu crescimento intelectual e profissional. A contribuição de cada um de vocês foi essencial. Em especial gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Rodrigo Araújo, sempre serei grata pela carta de recomendação que redigiu para mim e por todo o conhecimento transmitido, a Prof. MSc. Débora Dias, a Prof. Dr. Liliana Madalena, a Prof. Dr. Fernanda Gouveia, a Prof. Raphaela Sobreira Goto, a Prof. Dr. Karyme Vilhena, ao Prof. Jadus Marques, ao Prof. Dr. Marcelo Massulo e a tanto outros não citados, porém não menos importantes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira, por sua contribuição neste trabalho, pelas oportunidades oferecidas, pelos conhecimentos transmitidos e, acima de tudo, pela confiança depositada em mim, como sua orientada.

Ao Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto, por indiretamente ter me ensinado a amar o meu curso e futura profissão. O senhor é um grande exemplo, não apenas para mim como para muitos de seus alunos. Lhe parabênz por sua excelente didática, bem como sua ética profissional.

Ao engenheiro André Alessandro Nogueira, que tanto tem contribuído para a elaboração deste trabalho. Essa pesquisa foi iniciada por nós e esperamos que ela ainda nos conceda boas publicações. Obrigada pelas oportunidades, pelos ensinamentos e pela parceria.

Aos amigos que há três anos me acompanham no Laboratório de Análise de Estruturas e Materiais (LAEM), em especial a Davi B. C. Silva, por toda a paciência, dedicação e descontração. Mesmo sendo aluno, foi também meu professor e agora, de fato, tornou-se. Também a Jonatha Araújo e a Rafael Silva, que não pouparam esforços para ajudar a encarar o trabalho pesado envolvido nesta pesquisa.

À empresa Eletrobrás Eletronorte, pela disponibilização de informações e projetos necessários à pesquisa, assim como pela permissão de acesso às estruturas de concreto afetadas pela patologia estudada, dispostas em propriedades sob sua responsabilidade. Também aos funcionários da empresa que deram todo suporte a realização dos ensaios no paramento de montante da Eclusa 1, a exemplo Jorge, Mardenizio, Jailson, Carlos, Anselmo, dentre tantos outros.

Ao Prof. MSc. Wassim Raja El Banna, por prontamente ter me auxiliado com a primeira realização das análises por MEV.

A equipe do Laboratório da Eletrobras Furnas, em Goiânia (GO), pela maravilhosa recepção, pelos conhecimentos transmitidos e pelo apoio na realização das análises por MEV / EDS. Em especial a Heloísa Helena A. B. Silva, a Renato B. de Oliveira, a Eduardo de Aquino Gambale, a Anne Neiry de Mendonça Lopes, a Pedro de Carvalho Barros e a tantos outros, não citados aqui, porém não menos importantes.

A minha professora de português do ensino médio, Deusilene Ramos dos Santos, por sua prontidão em me auxiliar na revisão deste trabalho, ainda que o curto espaço de tempo não tenha colaborado. De todo modo, agradeço imensamente por ter se disponibilizado.

Ainda ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro em parte do período dedicado a esta pesquisa, por meio da bolsa PIBIC.

## RESUMO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo e principal constituinte de importantes empreendimentos, como é o caso das grandes barragens. Isto justifica a preocupação em conhecer o comportamento deste material, de modo manter a integridade e a segurança destas estruturas. Diversos mecanismos são capazes de acarretar a deterioração de elementos de concreto, sejam eles fundamentados em processos químicos ou físicos. A lixiviação é um desses. Por meio dela o concreto sofre, com o tempo, significativa redução de resistência e aumento de permeabilidade, devido principalmente à perda de massa por ela provocada. A lixiviação acarreta, através de processos químicos, a hidrólise dos componentes da pasta de cimento, devido a percolação de águas puras ou ácidas, favorecendo o carreamento de substâncias essenciais. Este meio de deterioração foi identificado em largo desenvolvimento na Eclusa 1, estrutura componente do Sistema de Transposição de Desnível da Barragem de Tucuruí, e analisado por meio da quantificação da perda de massa pelo maciço no período em estudo (doze meses) e da estimativa da consequente redução de resistência e aumento da porosidade do concreto. Além disso, algumas patologias identificadas no decorrer da pesquisa também foram analisadas, como a carbonatação e o desgaste superficial do paramento, de modo a verificar possíveis correlações com a patologia foco deste trabalho. O produto da lixiviação é uma crosta branca, também conhecida na literatura como eflorescência, que se forma devido ao contato entre o material lixiviado do concreto e o gás carbônico em suspensão no ar atmosférico. Para a mensuração da perda de massa no período em análise, foram relacionadas às vazões nos drenos onde se observou maior ocorrência da patologia e as diferenças entre as concentrações das substâncias encontradas em análises químicas realizadas na água que sai dos mesmos e na do reservatório resguardado pela barragem. A estimativa da perda de resistência foi possível por meio tanto de ensaio não destrutivo, em questão a esclerometria, quanto de ensaio destrutivo, englobando extração e rompimento de corpos de prova provenientes do concreto do paramento de montante da eclusa. A verificação do aumento da porosidade, por sua vez, teve o auxílio tanto de imagens obtidas com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) quanto de ensaios laboratoriais utilizados para a descoberta do índice de vazios, bem como da taxa de absorção dos testemunhos extraídos. A carbonatação foi mensurada com o auxílio de solução de fenolftaleína e paquímetro e o desgaste superficial medido empiricamente, a partir da comparação entre os corpos de prova extraídos abaixo do nível máximo de água (cota 74 m) e acima deste (utilizados como referência). Com efeito, a substância com valor mais expressivo entre as extraídas do concreto foi o cálcio, fato que justifica a intensa formação na saída dos drenos de carbonato de cálcio (eflorescência), bem como a perda de resistência, devido à retirada de produtos da pasta de cimento responsáveis pela conferência de resistência a mesma, e claro, o aumento da porosidade, uma vez que houve uma alteração na microestrutura do material, que teve parte de suas substâncias levadas pela ação da intensa percolação de água. Observou-se ainda ocorrência de carbonatação em todo o paramento e desgaste superficial generalizado e homogêneo abaixo do nível máximo d'água.

Palavras-chave: Lixiviação. Patologia. Concreto. Manifestação patológica. Carbonatação. Barragem de Tucuruí.

## ABSTRACT

Concrete is the construction material most used worldwide and main constituent of important developments, as in the case of large dams. This justifies the concern to know the behavior of this material, in order to maintain the integrity and safety of these structures. Several mechanisms are able to lead to the deterioration of concrete elements, be them based on chemical or physical processes. Leaching is one of these. Through it the concrete undergoes, in time, to a significantly reduce in resistance and increase in permeability, mainly due to mass loss caused by it. Leaching leads, through chemical processes, hydrolysis of the cement paste components due to percolation of pure or acidic waters, promoting the carrying of essential substances. This sort of deterioration was identified in broad development in the Lock 1, component structure of the System of Unevenness Transposition of Tucuruí Dam and analyzed by quantification of the massive mass loss during the study period (twelve months) and estimated the consequential reducing in resistance and increasing in the porosity of the concrete. Moreover, some pathologies identified during the study were also analyzed, such as carbonation and surface wear of the dam vestment in order to verify possible correlations with the pathology focus of this work. The leaching product is a white crust, also known in the literature as efflorescence, which is formed due to contact between the material leached of concrete and carbon dioxide suspended in atmospheric air. For the measurement of the mass loss in the period, were related the flows in drains where it was observed higher incidence of the pathology and the differences between the concentrations of the substances found in chemical analyzes of the water coming out of them and of the one in reservoir of the dam. The estimated loss of resistance was possible through both non-destructive test, in this case was used sclerometry, and even through destructive testing, comprising extraction and rupture of specimens from the concrete of the vestment upstream face of the Lock. Verification of the increase in porosity, in turn, had the aid of both images taken with a Scanning Electron Microscope (SEM) and laboratory tests used for the discovery of the void ratio and the absorption rate of the extracted specimens. The carbonation was measured with the support of phenolphthalein solution and caliper and surface wear was measured empirically from the comparison between the specimens taken below the maximum water level (height 74 m) and above it (used as reference). Indeed, the substance that had more significant value between the extracted from concrete is calcium, which justifies the intense generation in the output of the drains of calcium carbonate (efflorescence), as well as the loss of strength due to the removal of cement products responsible for the conference of its resistance and, of course, the increased of porosity, since there was a change in microstructure of the material, which had part of their substances carried by the action of intense water percolation. It was also observed occurrence of carbonation throughout the vestment and a widespread and uniform surface wear below the maximum water level.

Keywords: Leaching. Pathology. Concrete. Pathological manifestation. Carbonation. Tucuruí Dam.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Microestrutura do concreto. ....                                                                                                                                                                                                 | 9  |
| Figura 2 - Fatores que interagem para a formação de etringita tardia. ....                                                                                                                                                                  | 9  |
| Figura 3 - Gráfico demonstrando a redução da porosidade ao passo que se desenvolvem os produtos da hidratação. ....                                                                                                                         | 11 |
| Figura 4 - Gráfico esquemático ilustrando a correlação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto, frisando a influência das condições e do grau de adensamento. ....                                            | 13 |
| Figura 5 - Estimativa da penetração de água em uma barragem fictícia. ....                                                                                                                                                                  | 15 |
| Figura 6 - Influência do tamanho máximo do agregado em: a) Resistência à compressão, dependendo do teor de cimento empregado; e b) da quantidade de água de amassamento. ....                                                               | 18 |
| Figura 7 - Gráfico demonstrando a redução do custo do CCR por metro cúbico ao passo que se aumenta seu volume de consumo. ....                                                                                                              | 19 |
| Figura 8 - Vista superior esquemática demonstrando o posicionamento da Eclusa 1 e da Eclusa 2, em relação ao Lago da UHE Tucuruí, estando o canal intermediário entre elas. ....                                                            | 31 |
| Figura 9 - Vista aérea do barramento do Rio Tocantins, destacando as principais estruturas de concreto que o compõem. ....                                                                                                                  | 34 |
| Figura 10 - Planta chave da Eclusa 1, com destaque ao Bloco 1-A1. ....                                                                                                                                                                      | 34 |
| Figura 11 - Corte transversal do Bloco A da Eclusa 1, destacando os drenos de montante, moldados in situ, e a galeria de drenagem. ....                                                                                                     | 35 |
| Figura 12 - Planta chave da Eclusa 1, ressaltando os locais de aplicação do CCR (descrito na imagem como <i>rollcrete</i> ). ....                                                                                                           | 37 |
| Figura 13 - Corte transversal do Bloco 1-A1, evidenciando as camadas de concretagem nas quais foi utilizado CCR. ....                                                                                                                       | 38 |
| Figura 14 - Planta especificando os locais de aplicação de CCV e CCR ( <i>rollcrete</i> ), o local de acesso do rolo vibrador e as faixas de trabalho, nas quais havia o revezamento de lançamento, espalhamento e compactação de CCR. .... | 39 |
| Figura 15 - Corte demonstrando os locais de aplicação de CCV e CCR, além de destacar a disposição do tubo de drenagem e do enrocamento, a jusante do muro de ligação. ....                                                                  | 39 |
| Figura 16 – Demonstração em planta baixa da galeria de drenagem do Bloco 1-A1 do posicionamento dos drenos analisados durante a pesquisa (PC's – pontos de coleta). ....                                                                    | 49 |
| Figura 17 - Bloco 1-A1, em corte, demonstrando o tubo perfurado para a execução do ensaio de permeabilidade “ <i>in loco</i> ” ....                                                                                                         | 50 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18 – Ilustração esquemática do modo de operação do esclerômetro de reflexão. ....                    | 59 |
| Figura 19 - Pontos de análise pelo ensaio de esclerometria do Bloco 1-A1. ....                              | 60 |
| Figura 20 - Pontos de análise pelo ensaio de esclerometria do Bloco 1-C1.....                               | 61 |
| Figura 21 - Pontos de extração de testemunhos no paramento do Bloco 1-A1.....                               | 66 |
| Figura 22 - Composição interna básica de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).75                    |    |
| Figura 23 - Demonstração dos diferentes sinais originados pelo feixe de elétrons incidente na amostra. .... | 76 |
| Figura 24 - Exemplo da morfologia microscópica do hidróxido de cálcio. ....                                 | 79 |

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografia 1 -Vista superior da UHE Tucuruí.....                                                                                                                                                                                  | 30 |
| Fotografia 2 - Vista de montante da Eclusa 1, durante sua construção, antes do enchimento do reservatório.....                                                                                                                    | 32 |
| Fotografia 3 - Vista de jusante da Eclusa 1, após o início do enchimento do reservatório, ainda no decorrer da primeira etapa de construção.....                                                                                  | 33 |
| Fotografia 4 - Fotos do ano de 2010, tiradas antes (a) e após (b) o enchimento do canal intermediário.....                                                                                                                        | 33 |
| Fotografia 5 - “Costura” do contato CCV (à direita) x CCR (à esquerda), utilizando vibradores mecânicos.....                                                                                                                      | 40 |
| Fotografia 6 - Detalhe do molde metálico do tubo de drenagem, posicionado próximo ao contato CCV (à esquerda) x CCR (à direita).....                                                                                              | 40 |
| Fotografia 7 - Bloco 1-A1, observado de jusante para montante, durante a compactação do CCR. Destaca-se na fotografia o posicionamento dos moldes dos drenos.....                                                                 | 41 |
| Fotografia 8 - Vista geral da galeria de drenagem do Bloco 1-A1, cota 26,50 m, onde é possível observar eflorescências depositadas nas paredes e no piso.....                                                                     | 42 |
| Fotografia 9 - Detalhamento do dreno com maior quantidade de carbonato de cálcio depositada, sendo: a) vista geral; b) base; c) saída do dreno.....                                                                               | 42 |
| Fotografia 10 - Detalhamento de outro dreno, também com grande quantidade de eflorescência, sendo: a) vista geral; b) base; c) saída do dreno.....                                                                                | 42 |
| Fotografia 11 - Exposição da quantidade de material depositada nos tubos de cabos elétricos da galeria.....                                                                                                                       | 43 |
| Fotografia 12 - Galeria de drenagem do Bloco 1-C1, cota 26,50 m.....                                                                                                                                                              | 43 |
| Fotografia 13 - Caso pontual de lixiviação na escada localizada sobre o canal de enchimento da Eclusa 1.....                                                                                                                      | 44 |
| Fotografia 14 - Em alguns locais nota-se a formação de estalactites no teto na galeria de drenagem, outra comum manifestação da lixiviação.....                                                                                   | 44 |
| Fotografia 15 - Ocorrência de lixiviação em partes específicas de algumas paredes da galeria de drenagem, especialmente no contato concreto moldado <i>in loco</i> (nas paredes) e concreto pré-moldado (na abóbada do teto)..... | 45 |
| Fotografia 16 - Paramento de montante da Eclusa 1, lado A. Onde: a) vista geral; b) vista aproximada, evidenciando a exposição dos agregados abaixo do nível máximo d’água.....                                                   | 45 |
| Fotografia 17 - Falhas locais. Sendo: a) reparo realizado no paramento; b) e c) falhas expostas.....                                                                                                                              | 46 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografia 18 - Detalhamento da junta de dilatação entre os blocos 1-A1 e 1-A2, sendo: a) junta perfeitamente delineada; b) reparo realizado na junta, expondo falhas de concretagem.                                                                                                                                                  | 46 |
| Fotografia 19 – Orifício de aproximadamente 10 mm de diâmetro encontrado próximo ao enrocamento, provavelmente causado pela retirada, sem reparo, de um dos fixadores das fôrmas utilizadas durante a concretagem do paramento. Onde: a) vista externa; b) vista do interior.                                                          | 46 |
| Fotografia 20 - Demonstração de casos pontuais de lixiviação no paramento.                                                                                                                                                                                                                                                             | 47 |
| Fotografia 21 - Paramento do Bloco 1, lado C, sendo: a) vista geral e b) vista aproximada, evidenciando novamente a exposição dos agregados, assim como no lado A.                                                                                                                                                                     | 47 |
| Fotografia 22 - Vista aproximada do Dreno 4, ilustrando a quantidade de material depositada. Sendo a) antes da extração do material e b) após sua retirada com o auxílio de marreta e talhadeira.                                                                                                                                      | 51 |
| Fotografia 23 - Dreno 4, após finalizada a adaptação com conexão de PVC para direcionamento do escoamento de água.                                                                                                                                                                                                                     | 52 |
| Fotografia 24 – a) e b) Demonstração do momento da realização da medição de vazão, com auxílio de proveta graduada.                                                                                                                                                                                                                    | 52 |
| Fotografia 25 - Demonstração do conjunto guindaste – gaiola em operação no paramento de montante da Eclusa 1, lado A.                                                                                                                                                                                                                  | 59 |
| Fotografia 26 – Passo-a-passo adotado para a realização do ensaio de esclerometria. Onde: a) lixamento da superfície; b) demonstração da superfície lixada; c) marcação dos 16 quadrados para aplicação de impacto; e d) imposição do martelo de Schmidt sobre a superfície ensaiada.                                                  | 62 |
| Fotografia 27 - Extratora fixada no paramento da Eclusa 1, lado A , em operação. Sendo: a) disposição geral; b) vista aproximada da broca realizando o corte.                                                                                                                                                                          | 65 |
| Fotografia 28 - Demonstração do "pós-extração", sendo: a) testemunhos recém extraídos e b) orifícios remanescentes do processo de extração.                                                                                                                                                                                            | 67 |
| Fotografia 29 - Medição da profundidade de carbonatação. Onde: a) marcação dos quatro pontos equidistantes e b) utilização do paquímetro, valendo ressaltar a evidente diferença de coloração entre a zona carbonatada (incolor) e a íntegra (rosada).                                                                                 | 68 |
| Fotografia 30 - Desgaste superficial dos testemunhos. Onde: a) a esquerda, um corpo de prova extraído acima do nível máximo de água (referência) e, a direita, um extraído abaixo deste nível (analisado), exemplificando o notável desgaste e exposição dos agregados; e b) demonstração do processo empírico de medição do desgaste. | 69 |
| Fotografia 31 - Correção da altura dos testemunhos. Sendo: a) marcação e b) corte.                                                                                                                                                                                                                                                     | 70 |
| Fotografia 32 - Alguns dos testemunhos extraídos, após corte e capeamento.                                                                                                                                                                                                                                                             | 71 |
| Fotografia 33 - Posicionamento de um testemunho na prensa. Sendo: a) vista geral e b) vista aproximada.                                                                                                                                                                                                                                | 71 |

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fotografia 34 - Testemunhos sendo submetidos à fervura para ensaio de absorção .....                                                     | 73 |
| Fotografia 35 - a); b) e c) Manchas brancas notadas durante observação macroscópica das amostras. ....                                   | 77 |
| Fotografia 36 - MEV utilizado para a análise das amostras. ....                                                                          | 78 |
| Fotografia 37 - Equipamento utilizado para a metalização das amostras, durante a preparação das mesmas para o ensaio com MEV e EDS. .... | 78 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 1 - Índice Esclerométrico Efetivo (IEe) x Resistência à Compressão Equivalente (MPa), para aparelho utilizado em posição horizontal. ....                                                    | 64  |
| Gráfico 2 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 1 - Dreno “P2”.....                                                                                                                             | 84  |
| Gráfico 3 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 2 - Dreno “P2”.....                                                                                                                             | 84  |
| Gráfico 4 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 2 - Dreno “P3”.....                                                                                                                             | 85  |
| Gráfico 5 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 2 - Dreno “P4”.....                                                                                                                             | 85  |
| Gráfico 6 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 1 - Lago. ....                                                                                                                                  | 86  |
| Gráfico 7 - Cota média mensal do reservatório (m). ....                                                                                                                                              | 91  |
| Gráfico 8 - Contribuição de cada dreno na perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ , em porcentagem.....                                                                                                   | 94  |
| Gráfico 9 - Resultados da profundidade de carbonatação por amostra da faixa “Topo”, expondo a disparidade do valor encontrado para a amostra A-5 em relação aos demais.....                          | 102 |
| Gráfico 10 - Resultados da profundidade de carbonatação por amostra da faixa “Meio”, que apresentou a maior homogeneidade entre as três faixas, ficando, ainda assim com um CV considerado alto..... | 102 |
| Gráfico 11 - Resultados da profundidade de carbonatação por amostra da faixa “Fundo”, explicitando a disparidade do valor encontrado para a amostra A-4 em relação aos demais.                       | 103 |
| Gráfico 12 – Demonstração da linearidade entre os resultados da taxa de absorção e do índice de vazios para cada faixa de extração.....                                                              | 108 |
| Gráfico 13 - Correlação entre a taxa de absorção e a resistência à compressão para as diferentes faixas de extração.....                                                                             | 109 |
| Gráfico 14 - Correlação entre o índice de vazios e a resistência à compressão para as diferentes faixas de extração.....                                                                             | 109 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Traço do concreto disposto no paramento de montante da Eclusa 1.....                                                                                                                                                  | 36 |
| Tabela 2 - Controle tecnológico do concreto utilizado no paramento de montante da Eclusa 1.<br>.....                                                                                                                             | 36 |
| Tabela 3 – Alguns dos ensaios realizados nas amostras de água, demonstrando a metodologia para eles utilizada e a unidade de seus resultados. ....                                                                               | 54 |
| Tabela 4 - Traços utilizados na execução do reparo, para a argamassa e para a ponte de aderência (melechete). ....                                                                                                               | 67 |
| Tabela 5 - Diferença entre as concentrações de substâncias e parâmetros das águas da galeria (média dos drenos) e do lago, obtida por meio da utilização dos resultados das análises físico-químicas da água para cada mês. .... | 80 |
| Tabela 6 - Resultados obtidos nas análises de água para a concentração de $\text{Ca}^{+2}$ (mg/L), ressaltando os dados faltantes (“x”). ....                                                                                    | 83 |
| Tabela 7 - Média das concentrações de P2, P3 e P4 para preenchimento de dados faltantes em P1 e P5. ....                                                                                                                         | 86 |
| Tabela 8 - Concentrações de íons cálcio (mg/L), estando em destaque os valores obtidos a partir dos métodos adotados para o preenchimento de dados faltantes. ....                                                               | 88 |
| Tabela 9 - Quantidade mensal de íon $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada, em mg/L, por dreno analisado. ....                                                                                                                               | 88 |
| Tabela 10 - Dreno 1 - Análise da vazão do dreno em cada mês. ....                                                                                                                                                                | 89 |
| Tabela 11 - Dreno 2 - Análise da vazão do dreno em cada mês. ....                                                                                                                                                                | 89 |
| Tabela 12 - Dreno 3 - Análise da vazão do dreno em cada mês. ....                                                                                                                                                                | 89 |
| Tabela 13 - Dreno 4 - Análise da vazão do dreno em cada mês. ....                                                                                                                                                                | 90 |
| Tabela 14 - Dreno 5 - Análise da vazão do dreno em cada mês. ....                                                                                                                                                                | 90 |
| Tabela 15 - Dreno 1-b - Análise da vazão do dreno em cada mês. ....                                                                                                                                                              | 90 |
| Tabela 16 - Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ através do Dreno 1. ....                                                                                                                                                          | 92 |
| Tabela 17 - Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ através do Dreno 2. ....                                                                                                                                                          | 92 |
| Tabela 18 - Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ através do Dreno 3. ....                                                                                                                                                          | 92 |
| Tabela 19 - Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ através do Dreno 4. ....                                                                                                                                                          | 93 |
| Tabela 20 - Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ através do Dreno 5. ....                                                                                                                                                          | 93 |
| Tabela 21 – Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ através do Dreno 1-b. ....                                                                                                                                                        | 93 |

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 22 - Perda de massa de $\text{Ca}^{+2}$ total no decorrer do ano em análise. ....                                                                          | 94  |
| Tabela 23 - Resultados do ensaio de esclerometria no Bloco 1-A1. ....                                                                                             | 95  |
| Tabela 24 - Resultados do ensaio de esclerometria no Bloco 1-C1. ....                                                                                             | 96  |
| Tabela 25 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados obtidos por meio do ensaio de esclerometria no Bloco 1-A1, por faixa de ensaio..... | 96  |
| Tabela 26 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados obtidos por meio do ensaio de esclerometria no Bloco 1-C1, por faixa de ensaio..... | 97  |
| Tabela 27 - Profundidades de carbonatação medidas nos quatro pontos equidistantes de cada testemunho extraído.....                                                | 100 |
| Tabela 28 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação das profundidades de carbonatação obtidas para os testemunhos de cada faixa de extração.....           | 101 |
| Tabela 29: Resultados obtidos a partir da mensuração do desgaste superficial dos testemunhos extraídos abaixo do nível máximo de água. ....                       | 103 |
| Tabela 30 – Valores obtidos para a resistência à compressão axial dos testemunhos extraídos. ....                                                                 | 105 |
| Tabela 31 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados de resistência à compressão axial, por faixa de extração.....                       | 105 |
| Tabela 32 - Massas obtidas durante o ensaio de absorção, realizado segundo recomendações da ABNT NBR 9778:2005. ....                                              | 107 |
| Tabela 33 - Resultados obtidos para a absorção e para o índice de vazios dos testemunhos de concreto. ....                                                        | 107 |
| Tabela 34 - Valores calculados para massa específica seca, saturada e real. ....                                                                                  | 110 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                 |                                                                  |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                         |
| ACI             | American Concrete Institute                                      |
| a/c             | fator ou relação água/cimento                                    |
| A <sub>ft</sub> | Etringita                                                        |
| A <sub>fm</sub> | Monossulfato                                                     |
| <i>apud</i>     | citado por                                                       |
| C-H             | Hidróxido de cálcio                                              |
| C-S-H           | Silicato de cálcio hidratado                                     |
| CEMIG           | Companhia Energética de Minas Gerais                             |
| CCR             | Concreto Compactado com Rolo                                     |
| CCV             | Concreto Convencional Vibrado                                    |
| CM              | Concreto Massa                                                   |
| cm              | centímetro                                                       |
| CV              | Coeficiente de Variação                                          |
| DMC             | Dimensão Máxima Característica (do agregado)                     |
| DNIT            | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes           |
| DP              | Desvio Padrão                                                    |
| EDS             | <i>Energy Dispersive System</i> ou Sistema de Energia Dispersiva |
| EDX             | Energia Dispersiva de Raios-X                                    |
| <i>et al.</i>   | e outros                                                         |
| H               | hora                                                             |
| IE              | Índice Esclerométrico                                            |
| IEe             | Índice Esclerométrico efetivo                                    |
| kg              | quilograma                                                       |
| L               | litro                                                            |
| m               | metro                                                            |
| MEV             | Microscópio/Microscopia Eletrônico (a) de Varredura              |
| mg              | miligrama                                                        |
| mm              | milímetro                                                        |
| MPa             | Megapascal                                                       |
| N               | Newton                                                           |

|         |                                            |
|---------|--------------------------------------------|
| NBR     | Norma Brasileira                           |
| p.      | página                                     |
| PC      | Ponto de Coleta (de água)                  |
| pH      | potencial hidrogeniônico                   |
| s       | segundo                                    |
| SI      | Sistema Internacional (de unidades)        |
| UHE     | Usina Hidrelétrica                         |
| UHE DRJ | Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão |
| UR      | Umidade Relativa                           |

## SUMÁRIO

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                          | <b>1</b>  |
| 1.1      | IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....                        | 1         |
| 1.2      | OBJETIVOS .....                                                  | 3         |
| 1.2.1    | Objetivo Geral .....                                             | 3         |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos .....                                      | 3         |
| 1.3      | ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                      | 4         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                | <b>6</b>  |
| 2.1      | CONCRETO.....                                                    | 6         |
| 2.1.1    | Pasta de cimento: composição e propriedades .....                | 7         |
| 2.1.2    | Propriedades do concreto endurecido.....                         | 11        |
| 2.1.2.1  | <i>Resistência .....</i>                                         | <i>12</i> |
| 2.1.2.2  | <i>Permeabilidade.....</i>                                       | <i>13</i> |
| 2.1.2    | Tipos de concreto .....                                          | 16        |
| 2.1.2.1  | <i>Concreto Convencional Vibrado (CCV).....</i>                  | <i>16</i> |
| 2.1.2.2  | <i>Concreto Massa.....</i>                                       | <i>16</i> |
| 2.1.2.3  | <i>Concreto Compactado com Rolo (CCR).....</i>                   | <i>18</i> |
| 2.2      | MÉTODOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO .....                        | 21        |
| 2.2.1    | Hidrólise dos componentes da pasta de cimento (Lixiviação) ..... | 22        |
| 2.2.1.1  | <i>Aspectos químicos do processo de lixiviação.....</i>          | <i>24</i> |
| 2.2.1.2  | <i>Consequências do processo de lixiviação.....</i>              | <i>26</i> |
| 2.2.2    | Carbonatação .....                                               | 27        |
| <b>3</b> | <b>LOCALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....</b>                              | <b>30</b> |
| 3.1      | UHE TUCURUÍ .....                                                | 30        |
| 3.2      | SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DE DESNÍVEL .....                        | 31        |
| 3.3      | ECLUSA 1 .....                                                   | 32        |
| 3.3.1    | Dados do concreto estudado.....                                  | 35        |
| 3.3.2    | Registro fotográfico do local – exposição da patologia .....     | 41        |
| 3.3.3    | Relato das condições do paramento de montante.....               | 45        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                  | <b>48</b> |
| 4.1      | MENSURAÇÃO DA PERDA DE MASSA .....                               | 48        |
| 4.1.1    | Medições de vazão .....                                          | 49        |
| 4.1.2    | Coletas de água.....                                             | 53        |
| 4.1.2.1  | <i>Parâmetros Físico-Químicos Analisados.....</i>                | <i>53</i> |
| 4.1.3    | Técnica utilizada para a quantificação .....                     | 55        |
| 4.2      | ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO .....                       | 58        |
| 4.2.1    | Ensaio não-destrutivo (Esclerometria) .....                      | 58        |
| 4.2.2    | Extração de corpos de prova (ABNT NBR 7680-1:2015) .....         | 64        |

|          |                                                                                                                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2.1  | <i>Determinação da profundidade de carbonatação e estimativa do desgaste superficial.....</i>                                                             | <i>69</i>  |
| 4.2.2.2  | <i>Teste de resistência.....</i>                                                                                                                          | <i>71</i>  |
| 4.2.2.3  | <i>Determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica (ABNT NBR 9778:2005).....</i>                                              | <i>74</i>  |
| 4.2.2.4  | <i>Verificação da microestrutura do concreto com o auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Sistema de Energia Dispersiva (EDS).....</i> | <i>76</i>  |
| <b>5</b> | <b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>                                                                                                           | <b>80</b>  |
| 5.1      | MENSURAÇÃO DA PERDA DE MASSA .....                                                                                                                        | 80         |
| 5.2      | ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO .....                                                                                                                | 95         |
| 5.2.1    | Ensaio não-destrutivo (Esclerometria) .....                                                                                                               | 95         |
| 5.2.2    | Resultados dos ensaios realizados a partir da extração dos testemunhos.....                                                                               | 100        |
| 5.2.2.1  | <i>Determinação da profundidade de carbonatação e estimativa do desgaste superficial.....</i>                                                             | <i>101</i> |
| 5.2.2.2  | <i>Teste de resistência à compressão.....</i>                                                                                                             | <i>105</i> |
| 5.2.2.3  | <i>Determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica.....</i>                                                                   | <i>107</i> |
| 5.2.2.4  | <i>Análise da microestrutura do concreto extraído.....</i>                                                                                                | <i>111</i> |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                                                                                                          | <b>125</b> |
| 6.1      | CONCLUSÕES .....                                                                                                                                          | 125        |
| 6.2      | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                                                                                    | 128        |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                                                                  | <b>130</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A análise experimental de estruturas, bem como a computacional, visa o melhor conhecimento do comportamento destas, de modo a fortalecer suas qualidades e reduzir suas fragilidades, ampliando as possibilidades de obras futuras e estendendo a vida útil daquelas que já existem. Faz-se isto a partir da dinamização de algumas de suas características, como exemplo a resistência, a estabilidade e a durabilidade.

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados atualmente, fato que se deve principalmente a três razões básicas: resiste à água, o que justifica há muito sua aplicação em estruturas destinadas a transporte, controle e armazenamento de água, como é o caso das barragens; possui grande flexibilidade de formatos, uma vez que se trata de um material de consistência plástica, enquanto fresco; e ainda, trata-se de um produto relativamente barato e disponível, ou seja, cujos componentes podem ser encontrados com facilidade no mercado. Além das vantagens citadas, o concreto não sofre corrosão e possui resistência mecânica considerável, inclusive resistência a carregamentos cíclicos e ao fogo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O concreto é, no entanto, como qualquer outro material, suscetível a deterioração, seja ela fundamentada em processos químicos ou físicos. A estrutura analisada por este trabalho está sendo acometida por um caso de lixiviação. Esta, por sua vez, é uma patologia, ou seja, uma “doença estrutural”, capaz de afetar significativamente a resistência e a porosidade do material citado.

### 1.1 IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A lixiviação é um processo de deterioração que se instala no concreto, causada por reações químicas. Para que ela ocorra, são necessárias interações químicas entre águas puras ou ácidas, que atuam como agente agressivo do ambiente, e o hidróxido de cálcio (em principal), presente na pasta de cimento. Trata-se de um fenômeno muito comum, principalmente em estruturas que de algum modo estão expostas ao contato frequente com água.

Normalmente, a lixiviação, também conhecida como hidrólise dos componentes da pasta de cimento, se desenvolve até que um equilíbrio químico seja atingido e daí, então, a reação cessa. Por isso, a maioria dos casos relatados possui limitada extensão e são relativamente simples, sendo a patologia comumente associada a meros danos estéticos, uma vez que leva a formação de eflorescências (crostas brancas) e estalactites na superfície do concreto. No entanto, mais que isso, a patologia estudada é capaz de afetar o concreto a nível estrutural, comprometendo sua resistência e favorecendo o aumento da porosidade do mesmo.

Poucos relatos são encontrados com ênfase nessas consequências mais prejudiciais da reação, principalmente baseados em ocorrências reais ou realizados em âmbito nacional. Algo facilmente observado para outras patologias; exemplos disso são estudos inerentes à carbonatação, à corrosão de armaduras ou à reação álcali-agregado.

Jorge *et al.* (2001) demonstram um estudo laboratorial, correlacionando a perda de massa por meio do processo de lixiviação acelerado com a redução da resistência e o aumento da porosidade de corpos de prova de Concreto Compactado com Rolo (CCR), controlando as variáveis envolvidas na reação através de uma adaptação empregada aos materiais normalmente utilizados no ensaio de permeabilidade à água sob pressão, regido atualmente pela ABNT NBR 10786:2013.

Santi (2008), por sua vez, descreveu e analisou um caso real de perda de massa devido à lixiviação, quantificando-a. Este foi encontrado na barragem da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ), estrutura composta também por CCR.

Szpilman *et al.* (1994) avaliaram os efeitos da lixiviação da cal do concreto da fundação da Casa de Força de Itaipu, considerando a possibilidade de comprometimento da estabilidade da estrutura devido à patologia. Eles julgaram que as reduções na resistência e no módulo de elasticidade do concreto seriam capazes de gerar deslocamentos ou rotação na estrutura, suficientes para impedir a operação dos equipamentos eletromecânicos. No estudo, tal hipótese foi descartada.

Em literaturas estrangeiras, por outro lado, é mais frequente encontrar casos estudados de lixiviação, em especial em trabalhos suecos, visto que lá essa é uma das patologias mais comuns em barragens. A pesquisa de Ekström (2001) é um exemplo. Ele

estudou a patologia tanto sob o aspecto experimental, como por meio de modelagem computacional do processo e de seus efeitos. A análise experimental foi desenvolvida em laboratório, de forma semelhante à realizada por Jorge *et al.* (2001).

O presente trabalho surge de modo a contribuir com a discussão acerca do processo de lixiviação do concreto, tendo em vista a reduzida quantidade de material relacionada ao tema disponível na literatura, principalmente nacional, e a descoberta recente de uma ocorrência em larga escala do referido fenômeno patológico em uma das estruturas que compõem o complexo da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí), mais precisamente na Eclusa 1 do Sistema de Transposição de Desnível.

Vale observar ainda que a pesquisa de Nogueira (2016) também esteve pautada na mesma ocorrência. No entanto, esta baseou-se em uma abordagem diferenciada, em relação a considerada neste trabalho, para a estimativa da perda de massa pelo concreto.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos que norteiam a realização da presente pesquisa se encontram descritos a seguir, tendo sido eles separados em objetivo geral e, a partir da fragmentação e especificação deste primeiro, objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por intuito primário possibilitar um melhor entendimento acerca do processo de lixiviação do concreto, tendo por base o estudo de caso realizado. Nele, diversos parâmetros deste material foram analisados, de modo a demonstrar o quanto ele pode ser afetado por este meio de deterioração. Além disso, expor maneiras de sanar o problema e evitar sua ocorrência em obras futuras, ampliando a vida útil de estruturas de concreto.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) Verificar a vazão nos tubos de drenagem por meio dos quais a lixiviação está se manifestando com maior expressividade;

- b) Analisar física e quimicamente a água que sai dos drenos e a do reservatório da barragem (água de comparação), de modo a relacionar seus resultados, permitindo assim a identificação das substâncias extraídas e retidas no concreto;
- c) Estimar a perda de massa pelo concreto em decorrência da reação estudada, principalmente em função da extração de íons cálcio, ao longo de um ano, considerando as variações de vazão ocorridas nos drenos neste período;
- d) Analisar as propriedades do concreto do paramento de montante da Eclusa 1 através de ensaios destrutivos e não destrutivos, usando como referência a parte deste que se encontra acima do nível máximo d'água, visando identificar alterações em potencial nessas propriedades que possam ter relação com o desenvolvimento da patologia;
- e) Verificar microscopicamente amostras dos testemunhos extraídos por ensaio destrutivo, de modo a identificar possíveis consequências da lixiviação, por exemplo: atestar a ausência do hidróxido de cálcio e constatar o aumento da porosidade do concreto;
- f) No decorrer do estudo, avaliar ainda a existência de outras patologias em desenvolvimento no paramento, que possam estar relacionadas ou interligadas a reação foco deste trabalho, entre elas: a carbonatação e o desgaste superficial;
- g) Verificar as condições do concreto a montante, de modo a identificar as causas da excessiva infiltração e, conseqüentemente, da ocorrência de lixiviação no Bloco 1-A1, além de possíveis formas de reduzir ou sanar o problema.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. Dentre eles, o primeiro contempla uma breve introdução, seguida da descrição da importância e relevância da pesquisa, além de seus objetivos, tanto geral, quanto específicos.

O segundo apresenta a revisão bibliográfica, elucidando conceitos inerentes ao tema. Nele há uma explicação acerca do material concreto, bem como a descrição dos principais meios de deterioração capazes de danificá-lo, dentre eles, em especial, a lixiviação.

O terceiro capítulo demonstra uma localização detalhada do problema, apresentando desde a UHE de Tucuruí como um todo, até a Eclusa 1, onde a patologia foi identificada e, mais precisamente, sua galeria de drenagem.

No quarto capítulo há a descrição dos materiais e métodos utilizados durante a realização da pesquisa, tanto para a avaliação dos parâmetros físico-químicos da água coletada no interior da galeria e no reservatório e para a mensuração da perda de massa pelo concreto, quanto para a análise das propriedades deste material no paramento, retratando os ensaios destrutivos e não destrutivos executados. Encontra-se presente nele também a forma como foram avaliadas as outras patologias identificadas.

A apresentação, a análise e a discussão dos resultados estão dispostas no capítulo cinco, com o auxílio de gráficos, tabelas e imagens. Na sequência deste, foram apresentadas às considerações finais, englobando as conclusões obtidas por meio do desenvolvimento deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os conceitos fundamentais para o entendimento do presente estudo estão dispostos nos subcapítulos a seguir, auxiliando na compreensão da análise do processo de lixiviação em desenvolvimento na galeria de drenagem do Bloco 1-A1 da Eclusa 1.

### 2.1 CONCRETO

O concreto é um material compósito, basicamente formado pela mistura entre cimento Portland, agregado miúdo – partícula menor que 4,75 mm e maior que 75  $\mu\text{m}$ ; normalmente se utiliza a areia –, agregado graúdo – material granular maior que 4,75 mm; comumente faz-se uso da brita, obtida artificialmente por meio da detonação de rochas –, e água.

Em sua composição podem estar também inclusos aditivos e adições, quando se deseja conferir a ele características especiais, como maior trabalhabilidade ou maior tempo de pega, por exemplo. Lembrando que, neste contexto, o *tempo de pega* está relacionado ao processo de solidificação e endurecimento da mistura.

A qualidade de uma estrutura de concreto depende das propriedades de seus constituintes e de suas proporções, como também do modo como é executada, considerando as técnicas utilizadas para produção, transporte, adensamento e cura do concreto, por exemplo (TAM, 2002).

No que se refere ao arranjo microestrutural, o concreto é heterogêneo e complexo, se subdividindo em três fases básicas: a pasta de cimento hidratada, o agregado e a zona de transição na interface entre essas duas últimas. Sendo que, cada uma delas está intimamente ligada ao controle das propriedades deste material, tais como: a resistência, a durabilidade, a elasticidade e outras. Dentre as três fases, a zona de transição na interface é a menor (na ordem de 10 a 50  $\mu\text{m}$  de espessura) e também a mais frágil, influenciando assim no comportamento mecânico do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Por sua vez, a pasta de cimento hidratada é a mais diretamente afetada pela patologia estudada por este trabalho. Por isso, sua composição e suas propriedades estão descritas no subcapítulo a seguir.

#### 2.1.1 Pasta de cimento: composição e propriedades

O cimento Portland, antes da hidratação, é um pó cinza, resultado da associação entre uma pequena quantidade de sulfato de cálcio e o clínquer pulverizado. Este último é um produto de natureza granulosa formado da mistura de diversos compostos que reagem entre si sob elevadas temperaturas, como óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro. Algumas outras substâncias podem também ser empregadas na composição do cimento, sob o intuito de modificar suas propriedades, como o calor de hidratação e sua resistência a agentes agressivos, por exemplo (MEHTA; MONTEIRO, 2008; OLIVEIRA, 1987a).

A pasta de cimento, formada a partir da mistura do cimento com a água, é a principal responsável por uma das características mais valorizadas do concreto: a flexibilidade de formatos, permitida graças à sua plasticidade enquanto fresca e a posterior rigidez da mesma quando endurecida. Partindo de uma análise microestrutural, ela é composta basicamente por (MEHTA; MONTEIRO, 2008):

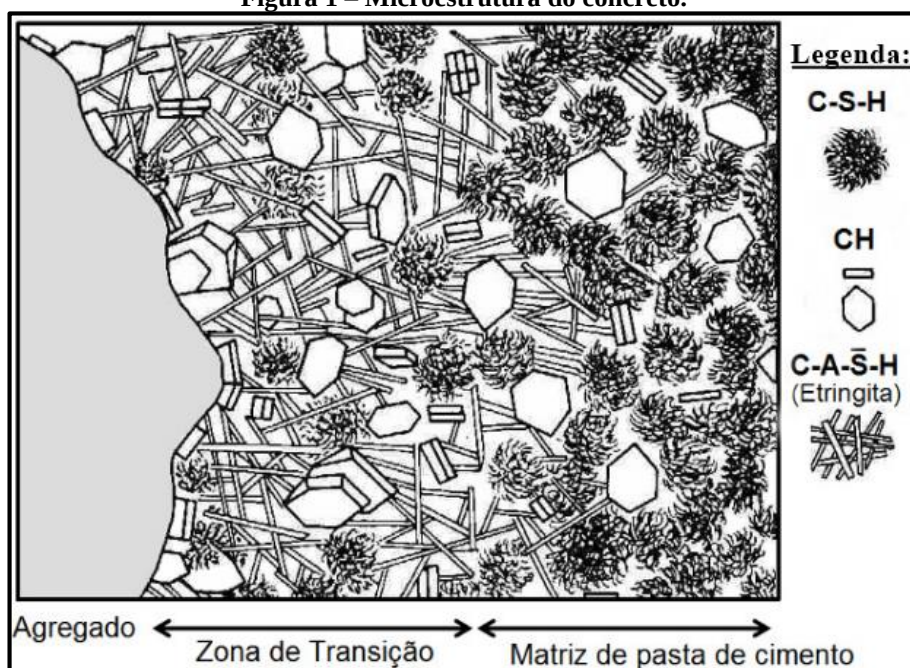
- a) Silicato de cálcio hidratado (C-S-H, onde  $C = CaO$ ,  $S = SiO_2$  e  $H = H_2O$ ): representa de 50 a 60% do volume de sólidos na pasta hidratada, sendo importante para a determinação de suas propriedades. A resistência deste material é relacionada às forças de atração de Van der Waals;
- b) Cristais de hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$  ou C-H): constituem de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada, tendo potencial contribuição à resistência da pasta. No entanto, inferior à do C-S-H, devido à área superficial menos expressiva;
- c) Sulfoaluminatos de cálcio: ocupam de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta de cimento hidratada, o que faz com que possuam um papel secundário nas relações microestrutura-propriedade;

- d) Grãos de clínquer não hidratados: podem ser encontrados na microestrutura, sendo sua ocorrência dependente da distribuição do tamanho das partículas de cimento anidro – não hidratado – e do grau de hidratação da pasta (idade);
- e) Vazios: a pasta de cimento hidratada possui diversos tipos de vazio, que muito influenciam em suas propriedades. Poros grandes (acima de 50 nm) afetam principalmente a resistência à compressão e a permeabilidade, enquanto poros pequenos (inferiores a 50 nm) influenciam mais na retração por secagem e na fluência – aumento gradual da deformação do concreto com o tempo, sob tensão constante;
- f) Água: a capacidade da pasta de reter água varia de acordo com sua porosidade e a umidade ambiente. Assim como os sólidos e os vazios, a água pode ser encontrada de diversas formas na pasta, sendo classificada diferentemente considerando o grau de dificuldade ou facilidade para que seja removida da mesma.

A Figura 1, disposta na página seguinte, demonstra esquematicamente os componentes da pasta de cimento, sob uma observação microscópica. Nela, os elementos fibrilares representam o C-S-H, as estruturas prismáticas, o C-H, e os cristais em formato de agulha, a etringita.

A etringita ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$  ou  $A_{ft}$ ) é um produto formado nas primeiras horas de hidratação, resultado da associação dos aluminatos à água, caracterizada por agulhas intertravadas que retêm água e podem prejudicar a trabalhabilidade da pasta, indicando uma falsa pega. Ela é instável e, logo que há uma redução na concentração de sulfato no meio, se transforma em cristais de monossulfato ( $C_4A\bar{S}.H_{18}$  ou  $A_{fm}$ ), formações hexagonais, organizadas como “rosas” e vulneráveis ao ataque de sulfatos. Se o sulfato volta a estar disponível, a etringita se forma novamente (FREITAS JR., 2013a).

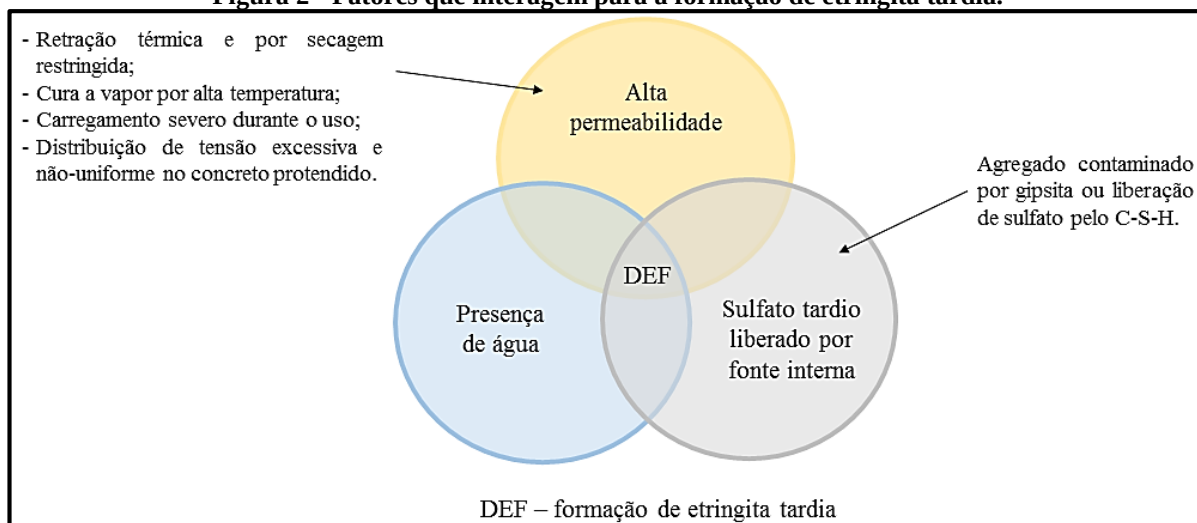
**Figura 1 – Microestrutura do concreto.**



Fonte: adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

Como citado por Mehta e Monteiro (2008), a etringita primária, formada durante a hidratação inicial da pasta de cimento, ao se decompor em monossulfato libera íons de sulfato que são adsorvidos pelo C-S-H e, com o uso da estrutura, vão se dissolvendo e formando novamente a etringita, agora dita secundária ou tardia. Os fatores que condicionam sua formação podem ser vistos na Figura 2, dentre eles: umidade, permeabilidade e presença de sulfato.

**Figura 2 - Fatores que interagem para a formação de etringita tardia.**

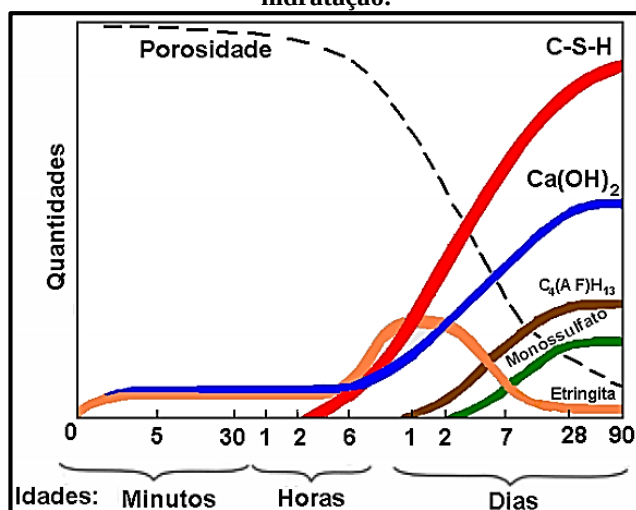


Fonte: adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

As propriedades da pasta de cimento dependem de suas características microestruturais e influenciam largamente em aspectos desejáveis para o concreto endurecido. São alguns destes aspectos (MEHTA; MONTEIRO, 2008):

- a) Resistência: são as forças de atração de Van der Waals as principais responsáveis pela resistência nos produtos sólidos da pasta de cimento. Estes, graças a elas, dependendo da sua área superficial, possuem maior ou menor adesividade, aderindo fortemente não apenas entre si, como também com partículas de agregado miúdo e graúdo, por exemplo. Estando a resistência vinculada a parte sólida da pasta, a presença de vazios a afeta. Tais vazios, por sua vez, podem ser reduzidos com a diminuição da quantidade de água adicionada ao cimento durante a mistura e com o aumento do grau (idade) de hidratação;
- b) Estabilidade dimensional: enquanto saturada, a pasta não é dimensionalmente estável, a menos que seja mantida a 100% de umidade relativa (UR). Qualquer umidade inferior a esta, provoca na pasta de cimento hidratada uma retração por secagem, principalmente quando a água é advinda das proximidades da superfície dos sólidos – adsorvida – ou de pequenas cavidades entre eles (inferiores a 50 nm). Além disso, se a pasta endurecida for submetida a carregamento constante, por fluência pode ocorrer à expulsão da água retida, ainda que com 100% de UR;
- c) Durabilidade: esta característica da pasta de cimento está intimamente relacionada à permeabilidade, conceituada como a facilidade com que um fluído sob pressão é capaz de fluir através de um sólido. A pasta de cimento é alcalina, logo, qualquer exposição às águas ácidas pode ser prejudicial para ela. Por isso, o ideal é que a pasta de cimento seja o mais impermeável possível, sendo este aspecto dependente do tamanho e da continuidade dos poros na microestrutura dos sólidos, que podem ser reduzidos, como citado anteriormente, por meio da redução do fator água/cimento ( $a/c$ ) e do aumento do grau de hidratação (como ilustrado na Figura 3).

Figura 3 - Gráfico demonstrando a redução da porosidade ao passo que se desenvolvem os produtos da hidratação.



Fonte: Weiss, J. (2005) apud Freitas Jr. (2013a).

### 2.1.2 Propriedades do concreto endurecido

O concreto é considerado um material sólido a partir da pega, continuando em evolução perpetuamente; a hidratação dele se desenvolve por meses e a resistência tende a crescer com o passar dos anos. Suas características e propriedades são, portanto, correlacionadas com sua idade e sua história, além de com as condições ambientais, físicas, químicas e mecânicas as quais estará submetido ao longo de sua vida útil (OLIVEIRA, 1987b).

Neste subcapítulo serão tratadas mais detalhadamente duas das mais importantes propriedades do concreto endurecido, que revezam sua prioridade de acordo com o tipo de estrutura, sendo elas: a resistência e a permeabilidade, da qual depende a durabilidade deste material.

Visando tornar clara esta relação entre ambas, expõem-se como exemplos: uma estrutura hidráulica, que deve prioritariamente ser estanque, logo, sua propriedade mais observada é a permeabilidade e a resistência se torna, neste caso, condição secundária; e um prédio de diversos pavimentos, que exige do concreto, em primeiro lugar, resistência mecânica, ainda que não deixe de necessitar da impermeabilidade para garantir sua durabilidade.

### 2.1.2.1 Resistência

A resistência mede a quantidade de tensão – definida como força por unidade de área – requerida para que um material atinja a ruptura. Para o dimensionamento estrutural, o concreto é considerado um material adequado para suportar principalmente esforços de compressão, uma vez que sua resistência à tração e à flexão são em média 10% e 15%, respectivamente, de sua resistência a este tipo de esforço (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

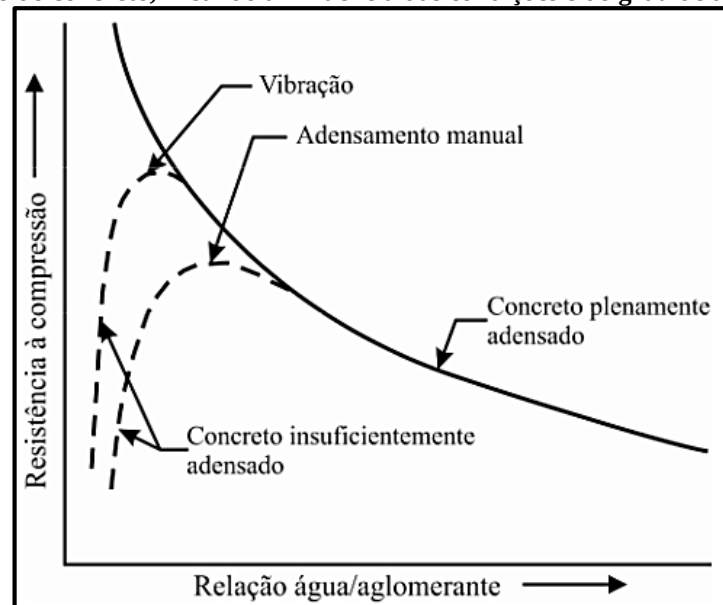
Ela pode ser afetada por diversos fatores, dentre eles: o traço, que relaciona as proporções de materiais presentes no concreto, como o cimento, os agregados e a água; e a idade do mesmo, que quanto maior, maior será o grau de hidratação e, conseqüentemente, a resistência (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Além destes fatores, podem influenciá-la ainda a relação água/cimento (a/c) e o grau de adensamento do concreto, seja ele manual ou mecânico (realizado com o auxílio de vibrador), como mostra a Figura 4.

A análise da resistência à compressão do concreto – uma de suas propriedades mais visadas, além de sua característica essencial – pode ser realizada com base no rompimento de corpos-de-prova, submetendo-os à compressão centrada, segundo especificações da ABNT NBR 5739:2007.

Esses corpos-de-prova, por sua vez, podem ser moldados para esta finalidade única ou extraídos de estruturas existentes, como foi necessário fazer durante a execução deste trabalho. Considerando a realização da extração de testemunhos, foram seguidos os preceitos da ABNT NBR 7680-1:2015.

**Figura 4 - Gráfico esquemático ilustrando a correlação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto, frisando a influência das condições e do grau de adensamento.**



Fonte: Neville e Brooks (2013).

#### 2.1.2.2 Permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade do concreto intrinsecamente relacionada à durabilidade deste material. Quanto maior ela for, mais ele estará suscetível à entrada de agentes agressivos, o que tende a reduzir sua vida útil.

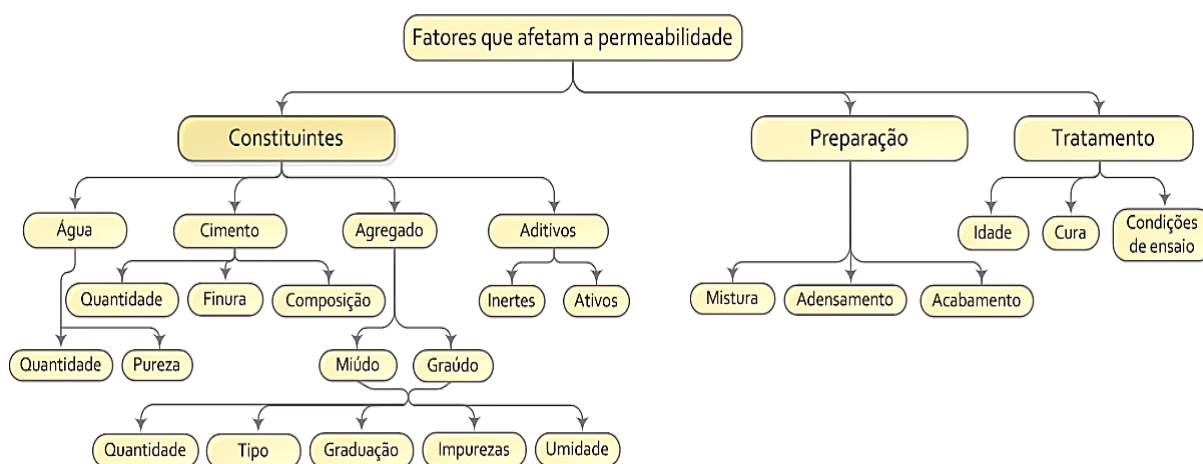
Invariavelmente, o concreto é um material poroso, sendo estes poros de origens diversas, como (OLIVEIRA, 1987b):

- a) Excesso de água de mistura necessária à obtenção de uma trabalhabilidade adequada;
- b) Fissuras de diferentes origens, dentre elas: térmicas, de retração, mecânicas e etc.;
- c) Má dosagem do material, responsável pelo aparecimento de vazios maiores;
- d) Ar eventualmente ou propositalmente arrastado durante a operação de mistura;
- e) Etc.

O que causa uma maior ou menor permeabilidade é, na verdade, a interligação destes poros, que quanto mais conectados mais afetarão nesta propriedade do material. Como citado por Neville e Brooks (2013), é possível que dois corpos porosos tenham a mesma porosidade, porém permeabilidades diferentes.

Alguns fatores capazes de influenciar diretamente na permeabilidade do material estão ilustrados por meio do Fluxograma 1. Conforme o mesmo, estes fatores podem ser divididos em três grandes grupos: 1) os constituintes, que envolvem os materiais que compõe a mistura do concreto, bem como sua integridade, quantidade e qualidade; 2) a preparação, que teoricamente deveria seguir técnicas rigorosas, comumente pouco praticadas; e 3) o tratamento, que corresponde ao modo como o material é acompanhado após sua preparação.

**Fluxograma 1 - Fatores que afetam a permeabilidade.**



**Fonte: adaptado de Oliveira (1987b).**

De maneira geral, existem três modos por meio dos quais a água é capaz de atravessar o concreto ou outro material semiporoso, sendo eles (FURNAS, 1997):

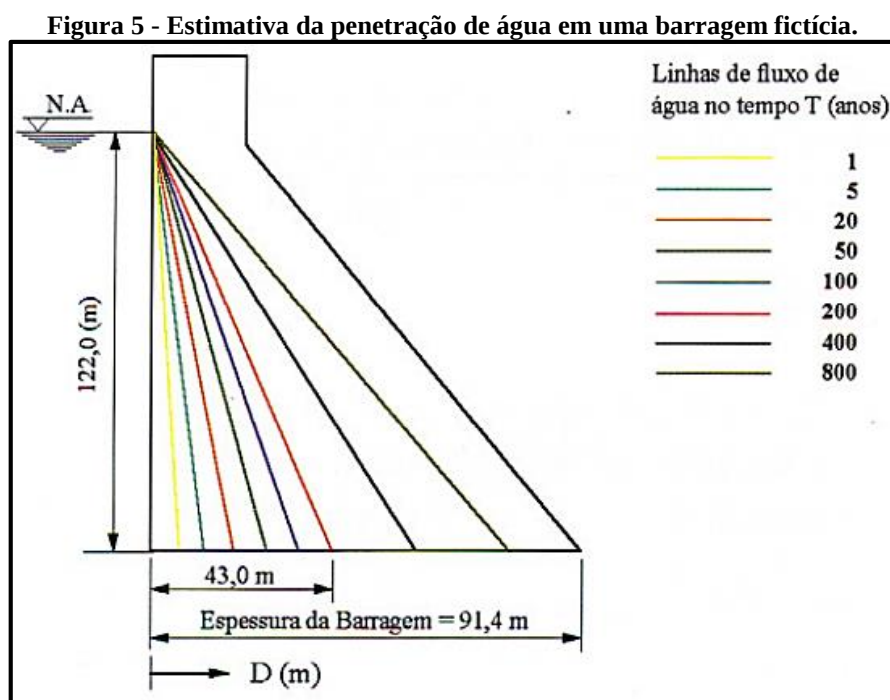
- a) Por percolação de água sob pressão, forçando o líquido da superfície exposta para a superfície livre, passando pelos espaços vazios;
- b) Por difusão, com o vapor d'água atravessando os poros devido à diferença de pressão de vapor entre as faces opostas do concreto;

- c) Por capilaridade – propensão que os fluídos possuem de fluir através de corpos porosos – e evaporação na superfície livre.

Em barragens de concreto, o efeito da permeabilidade pode ser ainda mais intenso, por se tratar de uma estrutura hidráulica, submetida a uma condição contínua de saturação. Além disso, devem-se considerar os fatores influentes mais previsíveis, como a variação sazonal do nível do reservatório, o tipo de concreto utilizado tanto na face do maciço, quanto no seu centro de massa, dentre outras questões.

A Figura 5 demonstra uma previsão da penetração de água em uma barragem, com o passar dos anos, considerando sua fundação impermeável e a ausência de drenos internos e de juntas de construção aliviando a pressão. Nesta barragem, o consumo de cimento estimado era de  $112 \text{ kg/m}^3$ , o nível de água seria constante em 122 m, o índice de vazios dela é de 5% e a permeabilidade no ponto médio é igual a  $5,66 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ .

Existem alguns métodos que permitem a avaliação da permeabilidade do concreto. Sendo que, dentre eles, o mais comum é a determinação do coeficiente de permeabilidade deste material por meio da percolação de água sob pressão, seguindo para a realização do ensaio em laboratório as prescrições da ABNT NBR 10786:2013.



Fonte: FURNAS (1997).

### 2.1.2 Tipos de concreto

Como citado anteriormente, o concreto advém de uma mistura. Esta, vez por outra, pode ser acrescida de outros materiais ou ainda executada e aplicada no local desejado através de métodos distintos. Faz-se isto visando melhorar as características do material final ou simplesmente reduzir seu custo, o que confere ao mercado diversos tipos de concreto.

Ao presente trabalho interessa citar, devido à correlação com o tema proposto e o objeto de estudo, três tipos de concreto em específico: o Concreto Convencional Vibrado (CCV), o Concreto Massa (CM) e o Concreto Compactado com Rolo (CCR), descritos nos subcapítulos que seguem.

#### 2.1.2.1 *Concreto Convencional Vibrado (CCV)*

Denomina-se CCV o concreto comum, sem características especiais de preparo e composição, adensado com o auxílio de vibradores mecânicos e utilizado na maioria das obras civis. Ele é feito com agregado natural e tem baixa relação resistência-peso se comparado ao aço (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 2.1.2.2 *Concreto Massa*

O Concreto Massa (CM) pode ser definido como qualquer volume de concreto com dimensões suficientes para requerer que medidas sejam tomadas para combater a geração de calor proveniente da hidratação do cimento e as consequentes variações volumétricas capazes de provocar fissuras (ACI, 1980). Ele pode ser utilizado na construção de vigas, pilares, estacas e comportas de grandes dimensões, bem como em barragens, onde seu uso é mais comum (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

No caso das barragens, a preocupação com as fissuras provocadas pelo calor de hidratação – e consequente retração – é mais intensa devido à propensão que estas fissuras, uma vez paralelas ao eixo da barragem, possuem de comprometer a estabilidade dimensional destas estruturas. Sendo, portanto, previsível que uma estrutura monolítica (sem fissuras ou descontinuidades) estará mais apta a se comportar como previsto em projeto, uma vez que manterá maior contato com as fundações e os apoios laterais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Estruturas de CM resistem a seus carregamentos não apenas graças à resistência do concreto, mas também ao seu formato estrutural e, sobremaneira, a sua massa (ACI, 1980).

Em barragens de gravidade, projetadas contra tombamento e deslizamento, a tensão de compressão máxima é extremamente reduzida; em unidades de MPa, é geralmente de 0,025 a 0,03 vezes a altura da barragem, em metros (PRICE, 1982 apud MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para exemplificar, uma barragem de 78 m de altura, como o Bloco 1 – A1 do muro de ligação da Eclusa 1 – em estudo –, possuiria uma tensão máxima de apenas 2,34 MPa.

Por segurança, é recomendável adotar para o concreto uma resistência de quatro vezes a tensão máxima calculada considerando esta relação, atuando em até um ano após a construção (a idade de 360 dias) (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Logo, para o exemplo citado anteriormente, a resistência requerida seria, arredondando para cima, de pelo menos 10 MPa.

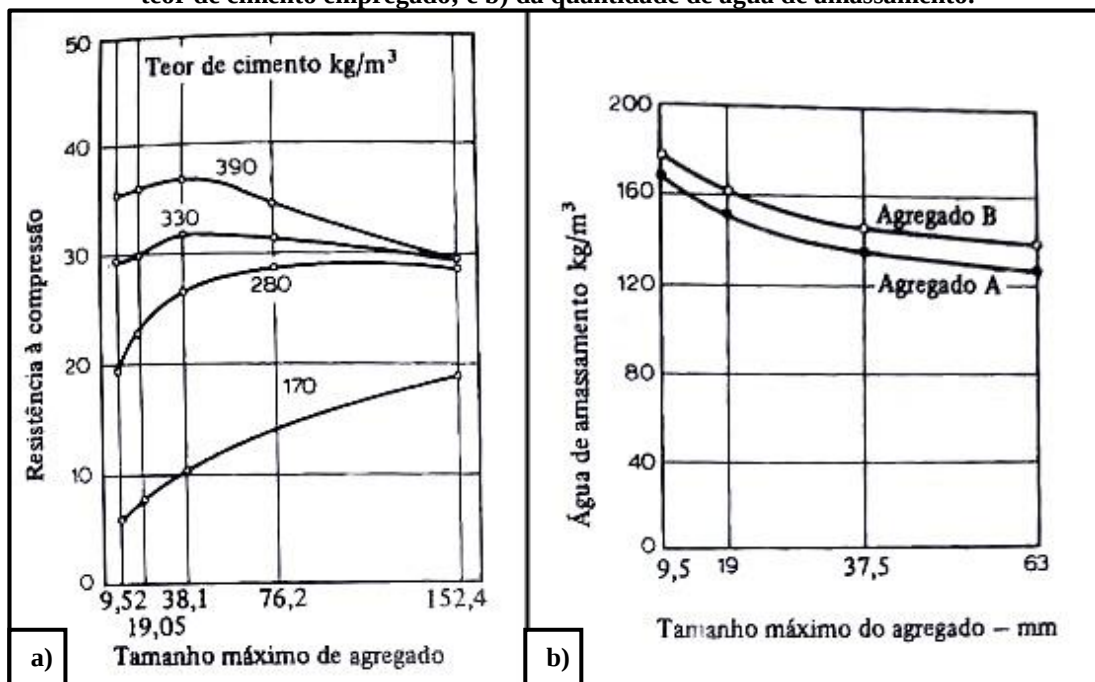
Assim como o CCV, o CM é composto de cimento, agregados e água, além de, em alguns casos, pozolana e outras adições. A dosagem do CM objetiva a seleção e a quantificação destes materiais de modo a proporcionar economia e redução do calor de hidratação, sem desconsiderar a obtenção de uma adequada trabalhabilidade, resistência, durabilidade e impermeabilidade que respeitem o propósito da estrutura na qual será aplicado (ACI, 1980).

Para tanto, é comum na composição do CM reduzir a quantidade de cimento, aumentar a Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado, fazer uso de um baixo consumo de água, dentre outras práticas, sem deixar de manter a observância nas propriedades citadas, conforme possível.

Quando a DMC do agregado é muito elevada, o concreto pode acabar por atingir resistências inferiores as que alcançaria com agregados menores, dependendo do teor de cimento. Quanto maior este teor, mais a DMC do agregado afeta negativamente o concreto. Para teores menores de cimento, no entanto, o aumento da dimensão do agregado pode acabar sendo favorável à resistência do concreto. A água necessária na mistura, por sua vez, será menor, quanto maior o tamanho máximo do agregado.

Esta influência que o aumento da dimensão do agregado tem sobre a resistência e o consumo de cimento, bem como sobre a quantidade de água de amassamento utilizada na mistura está apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Influência do tamanho máximo do agregado em: a) Resistência à compressão, dependendo do teor de cimento empregado; e b) da quantidade de água de amassamento.



Fonte: Neville (1997).

### 2.1.2.3 Concreto Compactado com Rolo (CCR)

O CCR pode ser definido como um tipo de concreto compactado com rolo compactador que, mesmo no estado fresco, é capaz de suportar este rolo enquanto passa pelo processo de compactação (ACI, 2000).

Para que a execução do CCR obtenha êxito, o concreto deve secar o bastante para que o rolo vibrador não afunde, além de estar suficientemente úmido, de modo a permitir a distribuição adequada da argamassa que o compõe durante a mistura e a compactação vibratória (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

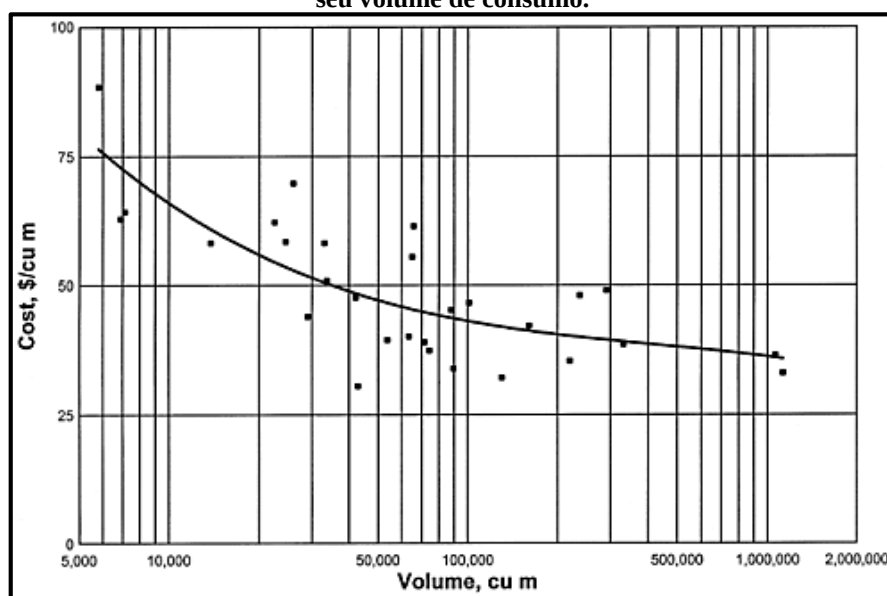
O CCR é aplicado por meio de um método econômico e largamente aceito para a construção de barragens e pavimentos. Para que as propriedades desejadas para o material endurecido sejam alcançadas é essencial que haja uma compactação adequada, sendo esta dependente de diversos fatores, como exemplo: os materiais e as proporções utilizadas na

composição do traço; os métodos de mistura, transporte, descarga e espalhamento do concreto; o equipamento e o procedimento utilizado para a compactação; e a espessura da camada de concretagem. Quando o concreto é livre de segregação, bem atrelado à junta de construção e compactado a máxima densidade possível são alcançadas para ele as melhores características de desempenho (ACI, 2000).

O U.S. Army Corps of Engineers (2000) apresenta algumas das principais vantagens da utilização de CCR em barragens de gravidade, que tornam a técnica economicamente competitiva. São elas:

- a) Custo: o custo por metro cúbico do CCR é em torno de 25 a 50% menor que o do CCV, devido às reduções de gastos com fôrma, lançamento, adensamento e, claro, tempo. Além disso, seu valor unitário varia de acordo com o volume de concreto consumido, sendo menor quanto maior o volume, como ilustra a Figura 7.

**Figura 7 - Gráfico demonstrando a redução do custo do CCR por metro cúbico ao passo que se aumenta seu volume de consumo.**



Fonte: U.S. Army Corps of Engineers (2000).

- b) Rapidez de execução: o tempo de execução de grandes projetos que fazem uso de CCR pode ser reduzido em muitos meses, ou mesmo em anos, se comparado a barragens de CCV ou terra;

- c) Vertedouros e estruturas pertinentes: assim como em barragens de CCV, barragens de CCR permitem que os vertedouros sejam diretamente incorporados a estrutura principal, sendo uma alternativa mais barata e prática que as barragens de terra (que necessitam a instalação desses dispositivos separadamente, sobre ombreiras);
- d) Redução de desvios e ensecadeiras: barragens de CCR permitem a execução de menores desvios do rio durante a construção, bem como uma minimização dos riscos e prejuízos associados com uma possível sobreposição da ensecadeira. Além disso, uma vez que necessitam de um período inferior de construção, as ensecadeiras podem ser mais baixas. Considerando estes fatores, o CCR se torna novamente mais vantajoso que as barragens de CCV e terra;
- e) Outras vantagens: comparadas às barragens de terra, barragens de CCR são internamente mais resistentes a erosões, possuem um menor volume, necessitam de uma menor reserva de materiais de construção e, conseqüentemente, de um menor canteiro, sendo ecologicamente mais viáveis.

Quanto à dosagem deste tipo de concreto, uma das principais abordagens usa os princípios de compactação do solo, constituindo o CCR em um concreto magro, sem utilizar o convencional conceito de reduzir a relação água/cimento visando aumentar a resistência. Ao invés disso, procura-se uma mistura mais úmida, que suporte a operação do rolo vibrador, permitindo uma melhor compactação e, conseqüentemente, melhor resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Basicamente, o objetivo é o mesmo, porém é alcançado por meios distintos.

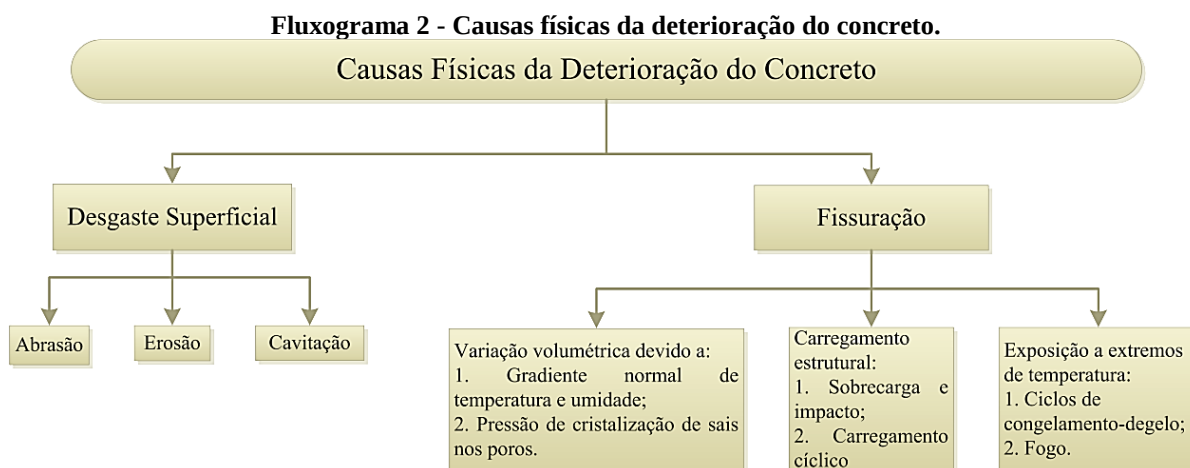
Em 1977, na obra de São Simão (CEMIG) foi aplicado pela primeira vez o CCR no Brasil. Em 1978, foram aplicados 26.000 m<sup>3</sup> no acesso às fundações da Estrutura de Desvio da Barragem de Itaipu. E em meados de 1979, foi executada uma praça experimental de aproximadamente 450 m<sup>3</sup> em Tucuruí, além de outra anterior de 90 m<sup>3</sup>, visando preparar as equipes de trabalho para a sua execução, bem como realizar estudos mais detalhados acerca das propriedades deste tipo de concreto. Nas estruturas permanentes da Eclusa, até 1985, foram aplicados cerca de 12.000 m<sup>3</sup>, com consumo de 51 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 30 kg/m<sup>3</sup> de

material pozzolânico e uma água unitária igual a 60 kg/m<sup>3</sup>. O método também já havia sido utilizado em outros países (PIMENTEL *et al.*, 1985).

## 2.2 MÉTODOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

O concreto pode sofrer deterioração de diversas formas e devido aos mais distintos fatores. Na literatura atual, normalmente, dividem-se suas causas em dois grandes grupos: as causas físicas e as causas químicas.

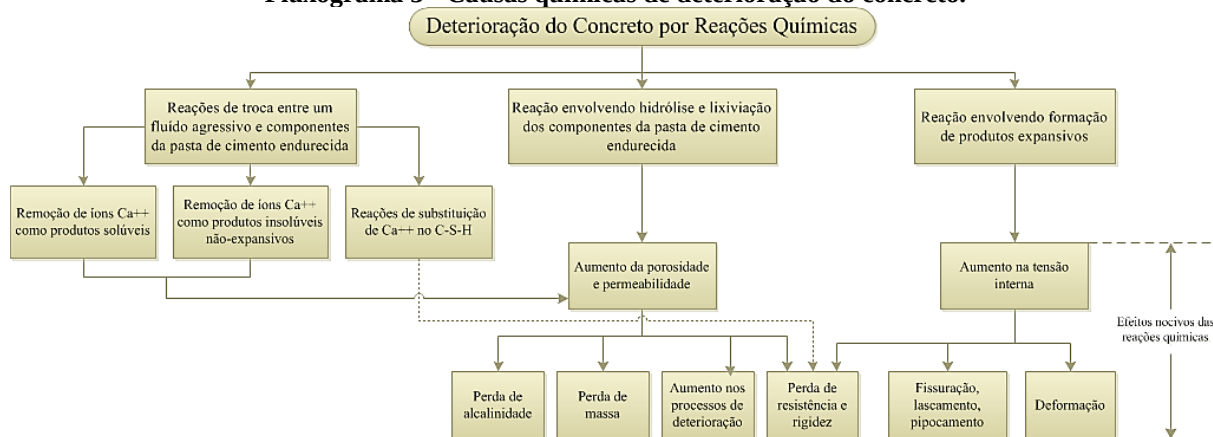
Como demonstrado no Fluxograma 2, a seguir, as causas físicas englobam basicamente o desgaste superficial, gerado seja pela abrasão, erosão ou cavitação da superfície de concreto; e a fissuração, provocada por variações volumétricas da peça ou maciço, pelo carregamento estrutural ou pela exposição a extremos de temperatura.



**Fonte:** adaptado de Mehta e Gerwick (1982) apud Mehta e Monteiro (2008).

Quanto às causas químicas, podem ser subdivididas três categorias: 1) reações de troca entre um fluido agressivo e os componentes da pasta de cimento endurecido; 2) reações envolvendo a hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta; e 3) reações envolvendo a formação de produtos expansivos (Fluxograma 3).

Alguns compostos da pasta de cimento elevam muito seu pH, mantendo-o normalmente entre 12,5 e 13,5, sendo eles: hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), os íons alcalinos  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  e os álcalis  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ , presentes nos fluídos dos poros. Qualquer meio que possua um pH diferente deste representa perigo para o concreto. Se abaixo de 6, é capaz inclusive de decompor diretamente a pasta (FREITAS JR., 2013b).

**Fluxograma 3 - Causas químicas de deterioração do concreto.**

Fonte: adaptado de Mehta e Gerwick (1982) apud Mehta e Monteiro (2008).

É essencial ressaltar que a distinção entre causas químicas e físicas de deterioração é meramente arbitrária. Na verdade, processos de deterioração normalmente se acumulam, ou seja, não ocorrem isoladamente. Por exemplo, a lixiviação dos componentes da pasta de cimento por água mole (com baixo teor de íons), que é um meio químico de deterioração, aumenta a porosidade do concreto, podendo ocasionar na sequência o desgaste superficial, por abrasão ou erosão (métodos físicos de deterioração), devido à maior exposição deste material (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A lixiviação, citada anteriormente como exemplo, é o método de deterioração que norteia este trabalho, sendo descrita mais detalhadamente no subcapítulo seguinte. Posterior a este, há outro subcapítulo com uma breve descrição do processo de carbonatação do concreto, que ao longo do desenvolvimento deste estudo também foi analisado, partindo do estabelecimento de uma possível correlação com a lixiviação que está ocorrendo na Eclusa 1.

### 2.2.1 Hidrólise dos componentes da pasta de cimento (Lixiviação)

A hidrólise dos componentes da pasta de cimento, mais conhecida como lixiviação, pode ser definida, basicamente, como a drenagem ou “carreamento” de sais solúveis em água que compõem o concreto devido à percolação desta substância através dele (CPWD, 2002).

Durante o processo de lixiviação, produtos de hidratação da pasta são dissolvidos do sistema de poros do concreto e transportados para fora, por difusão iônica ou pelo fluxo de água (EKSTRÖM, 2001).

As chamadas águas puras, advindas da condensação da neblina ou do vapor de água, e as águas moles, vindas da chuva ou da neve e do gelo derretidos, pobres em íon de cálcio, são as mais prejudiciais às estruturas de concreto. Isso porque, ao entrarem em contato com a pasta de cimento, tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos da pasta que contém cálcio. Normalmente, a reação cessa assim que a solução de contato entra em equilíbrio químico. No entanto, a hidrólise continuará indeterminadamente caso haja água corrente ou infiltração sob pressão. Uma vez que, nestes casos, a solução de contato será continuamente dissolvida, gerando condições para o prosseguimento da reação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Alguns fatores são capazes de ampliar os efeitos da lixiviação, dentre eles (EKSTRÖM, 2001):

- a) A elevada permeabilidade do concreto, além de qualquer aumento na mesma devido à própria lixiviação;
- b) A elevada concentração de cálcio no concreto, especialmente de hidróxido de cálcio;
- c) A elevada taxa de dióxido de carbono na água;
- d) A presença de água mole (conforme citado anteriormente).

Além destes, Biczok (1972) também cita alguns outros fatores capazes de influenciar a quantidade de material extraída do concreto devido a ação das águas moles, sendo eles:

- a) O estado de repouso ou movimento da água;
- b) A quantidade escoando sob pressão – quanto maior a pressão com que a água infiltra no concreto maior sua agressividade;
- c) A temperatura;
- d) A classe do cimento;

- e) A compacidade e o estado superficial do concreto;
- f) A dimensão da estrutura de concreto, bem como sua idade.

Estruturas de CCR tendem a ser menos suscetíveis à hidrólise, uma vez que costumam possuir um menor teor de cimento em relação ao concreto convencional. Além disso, em seu traço é recorrente a utilização de pozolana, que reage “amarrando” os componentes solúveis de cálcio. Esta tendência varia de acordo com tipo do cimento e da pozolana utilizados, bem como com as proporções da mistura. No caso de misturas muito secas, o comportamento pode ser inverso, ou seja, o cimento não hidratado pode conduzir a taxas de precipitação de carbonato de cálcio maiores que o esperado (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

Outra consideração importante é que, normalmente, concretos com um fator água/cimento menor do que 0,5 são considerados suficientes para estancar a penetração normal de água, no caso do desenvolvimento da lixiviação. Devendo-se também notar a presença de fissuras e irregularidades, que invariavelmente influem na permeabilidade do concreto (LAGERBLAD, 2001).

#### *2.2.1.1 Aspectos químicos do processo de lixiviação*

Dentre os constituintes da pasta de cimento, citados e explanados no subcapítulo 2.1.1, o mais suscetível à hidrólise, devido a sua elevada solubilidade em água pura (1230 mg/l), é o hidróxido de cálcio. Em teoria, caso haja presença de água corrente ou infiltração sob pressão a hidrólise irá continuar até que grande parte do hidróxido de cálcio seja eliminada pela lixiviação, como dito no subcapítulo anterior (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Ao observar as taxas de dissolução dos diferentes componentes do concreto, a do hidróxido de cálcio é normalmente a mais representativa, com exceção do hidróxido de potássio e do hidróxido de sódio, invariavelmente presentes na solução dos poros da pasta de cimento. Os silicatos de cálcio hidratado e os sulfoaluminatos, que também compõem a pasta, são menos solúveis. No entanto, quanto mais cálcio estiver incorporado nessas fases, mais solúveis serão (EKSTRÖM, 2001).

A reação inicialmente se desenvolve com rapidez, reduzindo progressivamente sua velocidade ao passo que há redução da cal hidratada no meio. A lixiviação do hidróxido de cálcio abre caminho para à destruição lenta de outros compostos hidratados da pasta, como os silicatos, aluminatos e ferroaluminatos, que só são estáveis na presença deste composto e em uma solução de pH elevado. Como consequência, o concreto perde sua resistência mecânica devido a formação de géis desprovidos de resistência e sem qualquer propriedade aglomerante (BICZOK, 1972; SZPILMAN, 1994).

É natural que, com o passar do tempo, o hidróxido de cálcio disponível para a ocorrência da reação diminua. Ainda assim, muitas vezes em barragens a precipitação ainda se mantém por muitos anos. Fato devido à existência de uma quantidade fixa de cal solúvel livre para a precipitação, quando ela diminui, haverá o transporte também de quantidades reduzidas de hidróxido de cálcio (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

O processo de lixiviação tem início quando a água começa a dissolver os componentes presentes nas paredes dos poros do concreto, em nível microestrutural. Faz-se possível descrevê-lo minuciosamente da seguinte maneira: 1) as moléculas de água difundem a reação nas paredes dos poros; 2) as moléculas de água dissolvem os componentes sólidos; e 3) os componentes dissolvidos são transportados do local da reação para a solução presente no interior do poro (EKSTRÖM, 2001).

O hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) é solubilizado pela hidrólise da pasta e, devido a lixiviação, é levado pela água até a superfície do concreto, onde carbonata em função do contato com o  $\text{CO}_2$  atmosférico, tendo como produto a formação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), conforme descrito na equação (1) (FREITAS JR., 2013b). A este produto costuma-se chamar eflorescência.



Somente quando as paredes dos poros se tornarem suficientemente pobres em componentes solúveis é que a formação de solução nos poros devido à lixiviação e a concentração de íons dissolvidos na água drenada através da estrutura irão diminuir (EKSTRÖM, 2001).

Conforme Szpilman (1994), uma remoção de até 20% da cal disponível no concreto não seria capaz de causar alterações significativas em suas propriedades.

#### *2.2.1.2 Consequências do processo de lixiviação*

Quando se trata do desenvolvimento da lixiviação em uma estrutura de concreto, as três propriedades deste material, primordialmente associadas ao processo, são: porosidade, permeabilidade e resistência.

Conforme citado por Ekström (2001), quando um material sólido é lixiviado, sua porosidade aumenta e sua concentração de íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) diminui. Por consequência, sua permeabilidade também aumenta e o processo de lixiviação acelera, ao passo que sua resistência sofre redução. Segundo Terzagui (1948, apud MEHTA; MONTEIRO, 2008), “um concreto que perdeu cerca de um quarto de seu conteúdo original de calcário teve sua resistência original reduzida à metade”.

Em uma barragem de concreto os danos podem ser ainda maiores. Visto que, quando a permeabilidade em diferentes partes do maciço sofre alteração, a pressão interna também varia. Com isso, a redução da resistência, acompanhada da alteração do gradiente de pressão são capazes de reduzir e comprometer a estabilidade de parte ou de toda a barragem (EKSTRÖM, 2001).

Além disso, o produto da lixiviação do concreto é capaz de interagir com o  $\text{CO}_2$  atmosférico, formando uma crosta branca de carbonato de cálcio na superfície, conhecida como eflorescência (MEHTA; MONTEIRO, 2008), citada no subcapítulo anterior ao relatar os procedimentos químicos da reação. Esta é uma das manifestações mais comuns desta patologia, além de ser considerado um “dano estético” para a estrutura.

A calcificação pode ser também vantajosa para o concreto, uma vez que permite, com o tempo, o fechamento dos pontos de infiltração, preenchendo-os com carbonato de cálcio. No entanto, o mesmo processo é capaz de obstruir os drenos das barragens, deixando escorregadio o piso de suas galerias e a água passível de mudanças de pH. Quando isso ocorre, é necessário realizar a limpeza dos drenos com o auxílio de soluções básicas / corrosivas (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2000).

### 2.2.2 Carbonatação

Basicamente, pode-se definir a carbonatação como um processo físico-químico de deterioração, capaz de progredir lentamente para o interior de estruturas de concreto, a partir da entrada nelas de seu agente principal, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A velocidade de penetração é condicionada pelos mecanismos de transporte no interior da microestrutura, como a difusão, a absorção capilar e a permeabilidade; e pela difusão dos gases por entre os poros e as fissuras do concreto (TASCA, 2012).

O  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) da pasta de cimento, formando carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), conforme descrito pela equação (1), mostrada anteriormente, sendo semelhante ao que ocorre na lixiviação.

O processo leva a redução do pH do concreto para valores inferiores a 9 (valendo lembrar que, como já citado, o pH normal do concreto fica entre 12,5 e 13,5), sendo essa uma das principais características desta patologia (SOUZA; RIPPER, 1998).

Outros componentes da pasta também podem reagir com o  $\text{CO}_2$ , ainda que com menor frequência, como por exemplo o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), o hidróxido de potássio ( $\text{KOH}$ ) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) (AGUIAR, 2006).

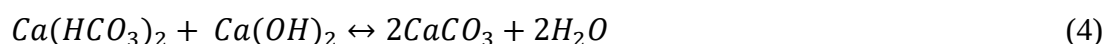
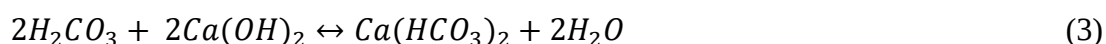
Além de lento, o processo de carbonatação é atenuado com o tempo, uma vez que, há a hidratação crescente do cimento e, além disso, há a formação de carbonato de cálcio pela própria reação, composto pouco solúvel capaz de colmatar os poros superficiais, dificultando gradualmente a entrada de  $\text{CO}_2$  (CASCUDO, 1997). Logo, quando carbonatado o concreto tem sua resistência mecânica ampliada, ao menos superficialmente, devido à redução de sua permeabilidade nesta região.

Conforme citado e explanado por SANTOS (2012) existem alguns fatores relacionados ao meio ambiente e as características do próprio concreto capazes de influenciar na velocidade e na profundidade de carbonatação, dentre eles:

- a) A concentração de  $\text{CO}_2$  no meio, capaz de acelerar a reação quanto maior for;

- b) A umidade relativa do ar, que quando entre 50% e 80% é mais favorável a ocorrência da carbonatação. Na ausência de água nos poros a carbonatação não ocorre, ainda que haja CO<sub>2</sub> presente. E, por sua vez, quando eles estão saturados, também não, devido à baixa difusão do CO<sub>2</sub> na água. Como também ressaltado por Figueiredo e Meira (2013), para que a carbonatação ocorra são necessários dois fatores essenciais: água e possibilidade de difusão de CO<sub>2</sub>;
- c) O tipo e a quantidade de cimento, que influem na quantidade de compostos alcalinos disponíveis para reagir com o CO<sub>2</sub>;
- d) A relação água/cimento da pasta, que condiciona a quantidade e o tamanho dos poros do concreto endurecido;
- e) As condições de cura, que se realizada de forma inadequada permite a formação de fissuras capazes de facilitar a entrada de CO<sub>2</sub>;
- f) As próprias fissuras, que abrem caminho para o CO<sub>2</sub>, bem como para a água, acelerando a penetração da carbonatação no concreto.

Quando o CO<sub>2</sub> está em contato com a solução do poro, algumas reações podem ocorrer, além da citada anteriormente. Dentre elas, as que estão presentes entre as equações (2) e (5) (EKSTRÖM, 2003).



Na equação (2), o próprio dióxido de carbono atmosférico é dissolvido pela água presente no poro, formando ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Na equação (3), o ácido carbônico, associado ao hidróxido de cálcio, produz bicarbonato de cálcio e água. Como também citado

por Freitas Jr. (2013b), quando o pH do concreto se encontra entre 8,5 e 9,0, com excesso de  $\text{CO}_2$  na água, há a formação de bicarbonato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ), um produto consideravelmente mais solúvel que o carbonato de cálcio.

Na equação (4), por sua vez, o bicarbonato formado reage novamente com o hidróxido de cálcio presente na pasta, resultando em carbonato de cálcio e água. Ela chega, portanto, ao mesmo resultado da equação (1), só que por um caminho mais extenso.

Por fim, na equação (5), pode-se observar mais uma possibilidade, a associação do carbonato formado com o ácido carbônico, produzindo bicarbonato de cálcio. Logo, esta última equação demonstra como tornar solúvel um produto comumente insolúvel, o carbonato de cálcio.

Essa sucessão de reações atacando o concreto acaba por torna-lo um material poroso e frágil, uma vez que o ácido carbônico, ao formar um produto solúvel, dissolve a camada carbonatada, desgastando superficialmente o concreto. Assim sendo, elevados níveis de carbonatação podem ser prejudiciais à integridade estrutural do material.

Em uma superfície de concreto constantemente exposta a água, como é o caso no presente estudo, o material dissolvido pode tanto percolar para o interior do concreto, quanto retornar para a água em contato com ele. Sendo, portanto, o desgaste superficial apenas mais uma consequência, ou uma manifestação, de patologias como a lixiviação e a carbonatação.

### 3 LOCALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Mais do que investigar, analisar, explorar e propor soluções para o problema estudado, é essencial situá-lo. O presente trabalho tem por foco o estudo da lixiviação do concreto, em desenvolvimento na Eclusa 1, pertencente ao Sistema de Transposição de Desnível da Barragem de Tucuruí, criada primordialmente para a instalação da Usina Hidroelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí).

O problema está concentrado no Bloco 1 – A1 do muro de ligação desta eclusa. Ele foi descoberto devido à excessiva manifestação da patologia estudada, por meio principalmente de eflorescências, encontradas na galeria de drenagem do bloco citado. A seguir, será explicitado resumidamente cada um destes locais envolvidos.

#### 3.1 UHE TUCURUÍ

A Usina Hidroelétrica de Tucuruí (Fotografia 1) está instalada no Rio Tocantins, próximo à cidade de Tucuruí, no sudeste do Pará, e possui uma potência instalada de 8.535 MW. Ela entrou em operação em 1984 e, até o presente momento, constitui-se na maior usina genuinamente brasileira (ELETROBRAS ELETRONORTE, 2016).

**Fotografia 1 -Vista superior da UHE Tucuruí.**



**Fonte: ELETROBRAS ELETRONORTE (2003).**

A UHE Tucuruí foi construída com intuito de gerar energia elétrica, fortalecendo sócio e economicamente a região norte e fornecendo energia também para as outras regiões. Sua obra foi realizada em duas etapas, sendo a primeira estendida de 1975 a 1992 e a segunda de 1998 e 2006 (HERWEG *et al.*, 2004).

A primeira contemplou doze máquinas de 350 MW e duas auxiliares de 22,5 MW, totalizando 4245 MW de potência instalada. Nela foram utilizados seis milhões e quatrocentos mil metros cúbicos de CCV. A segunda, por sua vez, contou com a instalação de mais onze unidades geradoras de 375 MW e nela houve o consumo de um milhão quinhentos e trinta mil metros cúbicos de CCV, além de setenta mil metros cúbicos de CCR (HERWEG *et al.*, 2004).

### 3.2 SISTEMA DE TRANSPOSIÇÃO DE DESNÍVEL

O Sistema de Transposição de Desnível de Tucuruí foi criado de modo a permitir que as embarcações vencessem o desnível provocado pela construção da barragem, ultrapassando-a navegando (DNIT; ELETROBRAS ELETRONORTE, 2011).

Ele foi construído na margem esquerda do rio e é composto de uma eclusa a montante, instalada na barragem de terra e enrocamento (Eclusa 1); um canal intermediário; uma eclusa a jusante (Eclusa 2); e um canal de jusante, que liga a Eclusa 2 ao rio (HERWEG *et al.*, 2004). A disposição dos referidos elementos que compõe o sistema está ilustrada na Figura 8.

**Figura 8 - Vista superior esquemática demonstrando o posicionamento da Eclusa 1 e da Eclusa 2, em relação ao Lago da UHE Tucuruí, estando o canal intermediário entre elas.**



Fonte: Geris Engenharia e Serviços LTDA (2008).

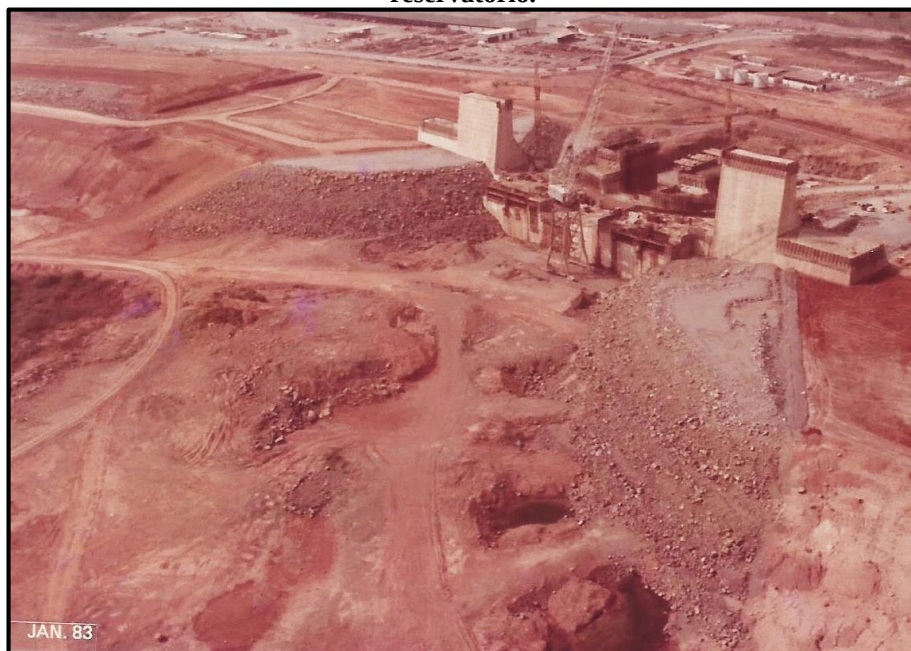
O comboio tipo para as eclusas de Tucuruí deve ter até 200 m de comprimento, 32 m de largura, 3,5 m de calado (altura submersa) e 15 m de altura livre (DNIT, 2011). Internamente, as câmaras das duas eclusas são iguais e possuem 210 m de comprimento por 33 m de largura. Cada uma delas permiti vencer um desnível de 36 m. Na Eclusa 1 foram utilizados tanto CCV quanto CCR, com volumes em torno de 747.000 m<sup>3</sup> e 12.000 m<sup>3</sup>, respectivamente, e na Eclusa 2 houve aplicação apenas de CCV, na ordem de 333.000 m<sup>3</sup> (HERWEG *et al.*, 2004).

De maneira geral, esta obra contou com 11.687.657 m<sup>3</sup> de escavação comum, 1.417.830 m<sup>3</sup> de escavação em rocha, 4.970.972 m<sup>3</sup> de aterro compactado, além de 1.283.880 m<sup>3</sup> de concreto e 10.206 t de montagem eletromecânica (ELETROBRAS ELETRONORTE, 2010a).

### 3.3 ECLUSA 1

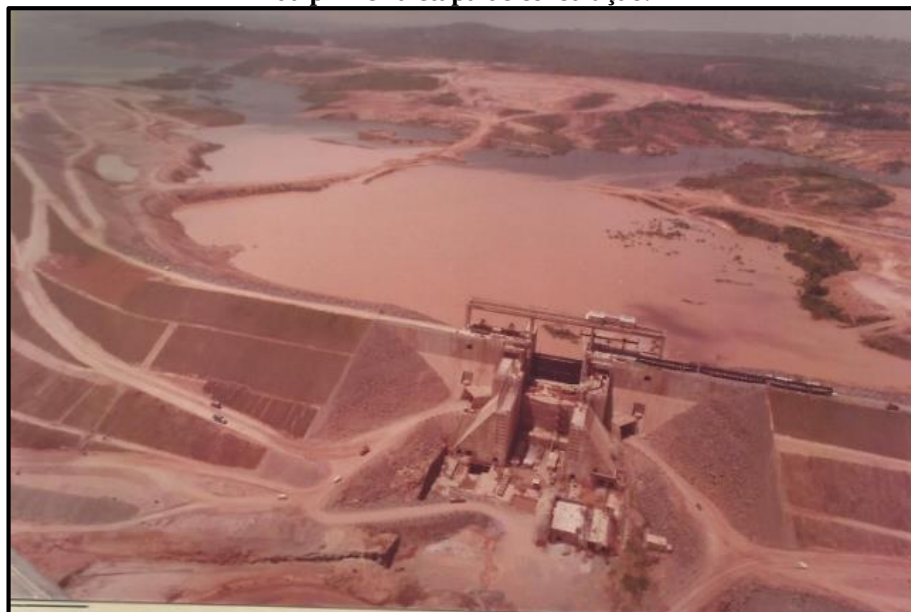
A Eclusa 1, objeto de estudo desta pesquisa, teve sua construção iniciada em 1982 (como mostram as Fotografias 2 e 3), por seu muro de ligação, integrado ao barramento do rio. No entanto, ela só foi concluída anos mais tarde, em 2010, como ilustra a Fotografia 4.

**Fotografia 2 - Vista de montante da Eclusa 1, durante sua construção, antes do enchimento do reservatório.**



**Fonte: ELETRONORTE (1983).**

**Fotografia 3 - Vista de jusante da Eclusa 1, após o início do enchimento do reservatório, ainda no decorrer da primeira etapa de construção.**



**Fonte: ELETROBRAS ELETRONORTE (1984).**

**Fotografia 4 - Fotos do ano de 2010, tiradas antes (a) e após (b) o enchimento do canal intermediário.**



**Fonte: ELETROBRAS ELETRONORTE (2010b).**

Em relação à UHE de Tucuruí, a Eclusa 1 está localizada como ilustrado na Figura 9, nela estão destacadas as principais estruturas de concreto que compõem a barragem. A Eclusa 1 é dividida em nove blocos, no sentido de montante (lado do lago) para jusante (onde há o canal intermediário). O Bloco 1, também conhecido como muro de ligação, é responsável por fazer a associação desta eclusa com a barragem.

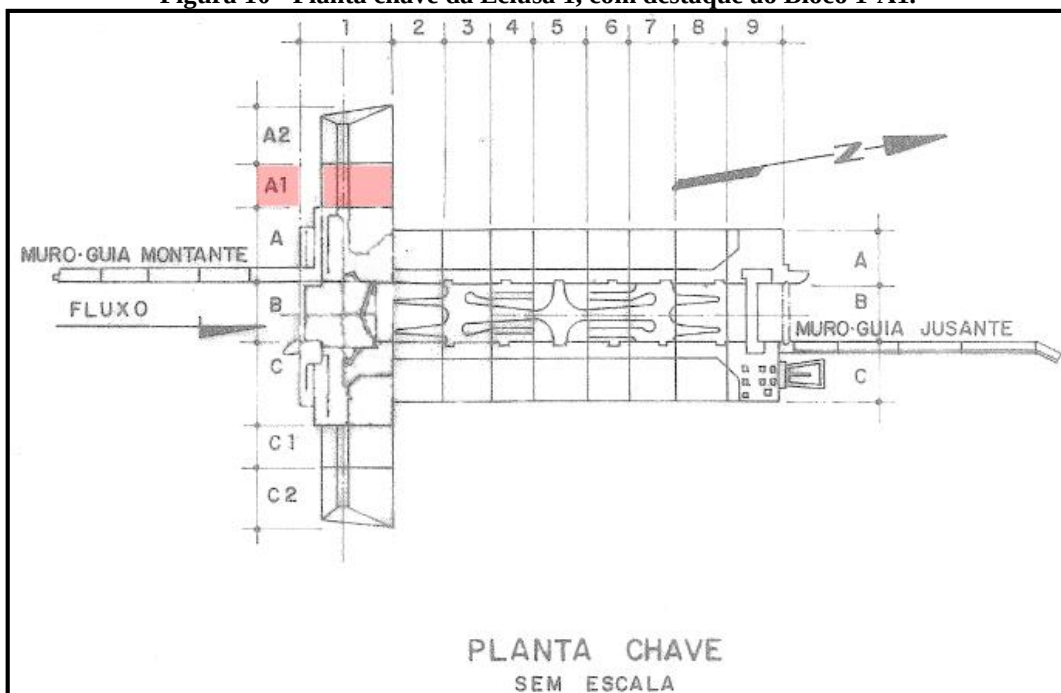
**Figura 9 - Vista aérea do barramento do Rio Tocantins, destacando as principais estruturas de concreto que o compõem.**



Fonte: Herweg *et al.* (2004).

Conforme anteriormente citado, manifestações da lixiviação foram largamente encontradas na galeria de drenagem, cota 26,50 m (em relação ao nível do mar), do Bloco 1 – A1. Ele está posicionado, em relação a Eclusa 1 de modo geral, como demonstra a Figura 10.

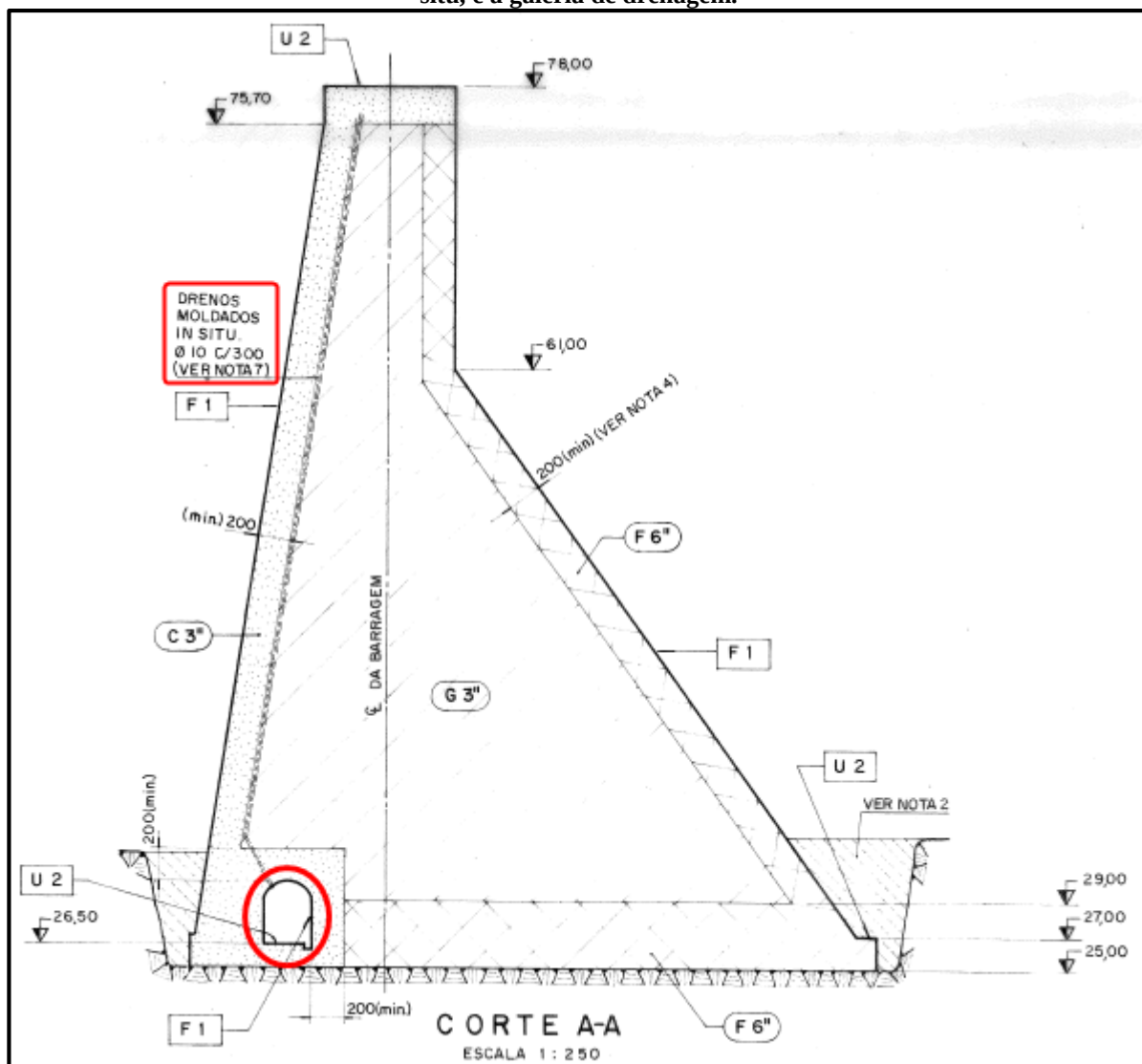
**Figura 10 - Planta chave da Eclusa 1, com destaque ao Bloco 1-A1.**



Fonte: adaptado de ELETRONORTE (1982a).

Na Figura 11, a seguir, há um corte transversal do referido bloco, evidenciando o posicionamento da galeria de drenagem em relação ao maciço, além de fazer menção aos drenos de montante, cuja finalidade será explicitada no próximo subcapítulo.

**Figura 11 - Corte transversal do Bloco A da Eclusa 1, destacando os drenos de montante, moldados in situ, e a galeria de drenagem.**



Fonte: adaptado de ELETRONORTE (1982a).

### 3.3.1 Dados do concreto estudado

Para que a água do reservatório atinja os drenos que deságuam na galeria de drenagem, ela tem que ultrapassar uma barreira de dois metros de concreto, cujo traço, como pôde ser visto na Figura 11, mostrada anteriormente, é denominado C3''. F1, que também aparece na imagem e está indicado no paramento, representa apenas um acabamento

superficial. C3” simboliza um concreto classe C, com diâmetro do agregado em polegadas igual a 3, que equivale a uma DMC de 76 mm. Este traço está demonstrado detalhadamente na Tabela 1.

**Tabela 1 - Traço do concreto disposto no paramento de montante da Eclusa 1.**

|                                   |                   |         |
|-----------------------------------|-------------------|---------|
| <b>Nomenclatura do Traço</b>      |                   | C76-01S |
| <b>Fck de projeto</b>             | <b>(MPa/dias)</b> | 15/28   |
| <b>Fator água/cimento</b>         |                   | 0,48    |
| <b>Cimento</b>                    | <b>(kg/m3)</b>    | 148,00  |
| <b>Material pozzolânico</b>       | <b>(kg/m3)</b>    | 44,00   |
| <b>Água</b>                       | <b>(kg/m3)</b>    | 95,00   |
| <b>Areia Natural</b>              | <b>(kg/m3)</b>    | 649,00  |
| <b>Brita 1</b>                    | <b>(kg/m3)</b>    | 304,00  |
| <b>Brita 2</b>                    | <b>(kg/m3)</b>    | 531,00  |
| <b>Brita 3</b>                    | <b>(kg/m3)</b>    | 683,00  |
| <b>Aditivo incorporador de ar</b> | <b>(kg/m3)</b>    | 0,158   |
| <b>Aditivo retardador de pega</b> | <b>(kg/m3)</b>    | 0,594   |

Fonte: ELETRONORTE, 1982b.

O controle tecnológico deste traço, realizado no período de sua utilização, apontou os resultados demonstrados na Tabela 2, a seguir.

**Tabela 2 - Controle tecnológico do concreto utilizado no paramento de montante da Eclusa 1.**

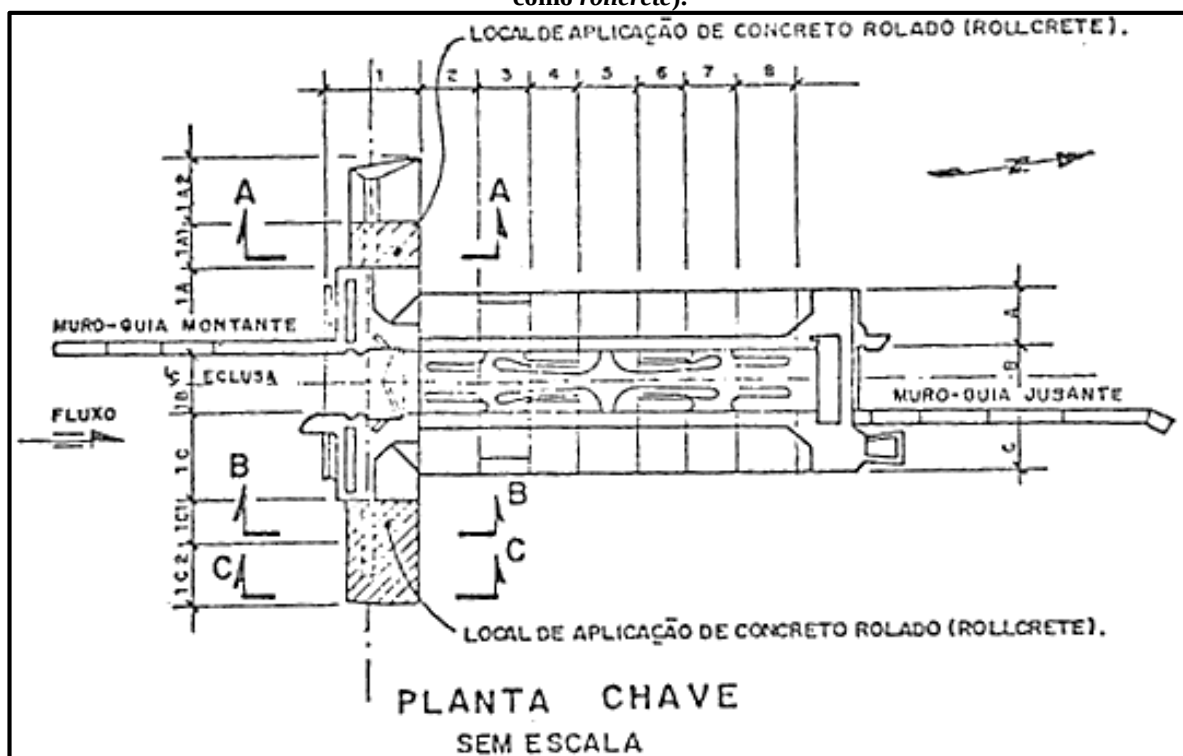
| <b>Tempo (dias)</b> | <b>Dado apresentado</b>      | <b>Resultados para o Traço C76-01S</b> |
|---------------------|------------------------------|----------------------------------------|
| <b>7</b>            | Nº de amostras (unid.)       | 13,00                                  |
|                     | Resistência média (MPa)      | 16,90                                  |
|                     | Desvio Padrão (MPa)          | 2,08                                   |
|                     | Coefficiente de Variação (%) | 12,27                                  |
| <b>28</b>           | Nº de amostras (unid.)       | 91,00                                  |
|                     | Resistência média (MPa)      | 23,20                                  |
|                     | Desvio Padrão (MPa)          | 2,40                                   |
|                     | Coefficiente de Variação (%) | 10,31                                  |
| <b>90</b>           | Nº de amostras (unid.)       | 56,00                                  |
|                     | Resistência média (MPa)      | 27,80                                  |
|                     | Desvio Padrão (MPa)          | 2,59                                   |
|                     | Coefficiente de Variação (%) | 9,32                                   |

Fonte: ELETRONORTE, 1982.

Segundo as informações encontradas, então, o concreto do paramento, que foi estudado para a verificação da perda de massa (através da observação de sua porosidade) e de resistência (por meio de ensaio de compressão) devido à lixiviação, possuía inicialmente os materiais citados na Tabela 1, nas proporções nela referidas, e resistência de projeto de 15 MPa aos 28 dias, ainda que o controle tecnológico tenha chegado a resultar uma média de 27,8 MPa para o mesmo traço aos 90 dias (Tabela 2).

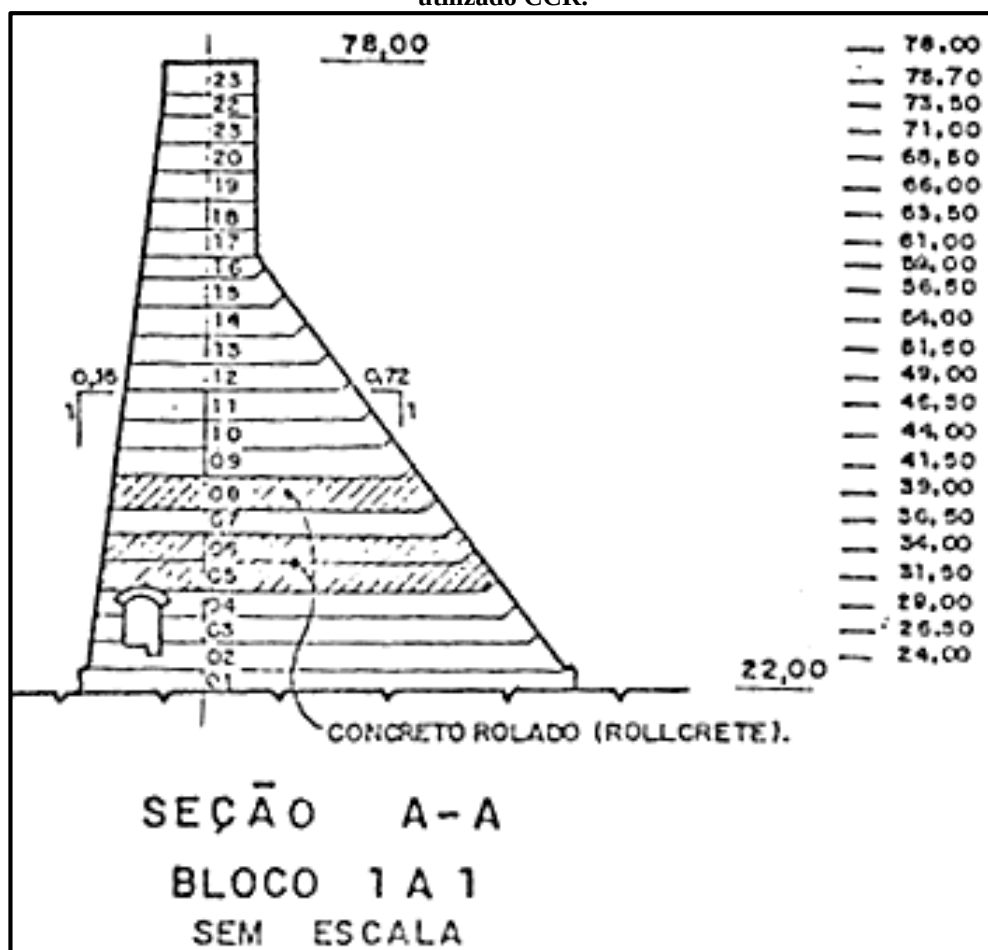
Como citado anteriormente, na Eclusa 1 foram aplicados tanto CCV, quanto CCR, sendo o traço referenciado acima um exemplo de CCV. O CCR, por sua vez, foi aplicado apenas nos blocos 1-A1, 1-C1 e 1-C2, conforme é possível observar na planta demonstrada na Figura 12. Após esta, a Figura 13 confere especial enfoque ao bloco 1-A1, exposto em corte.

Figura 12 - Planta chave da Eclusa 1, ressaltando os locais de aplicação do CCR (descrito na imagem como rollcrete).



Fonte: Pimentel *et al.* (1985).

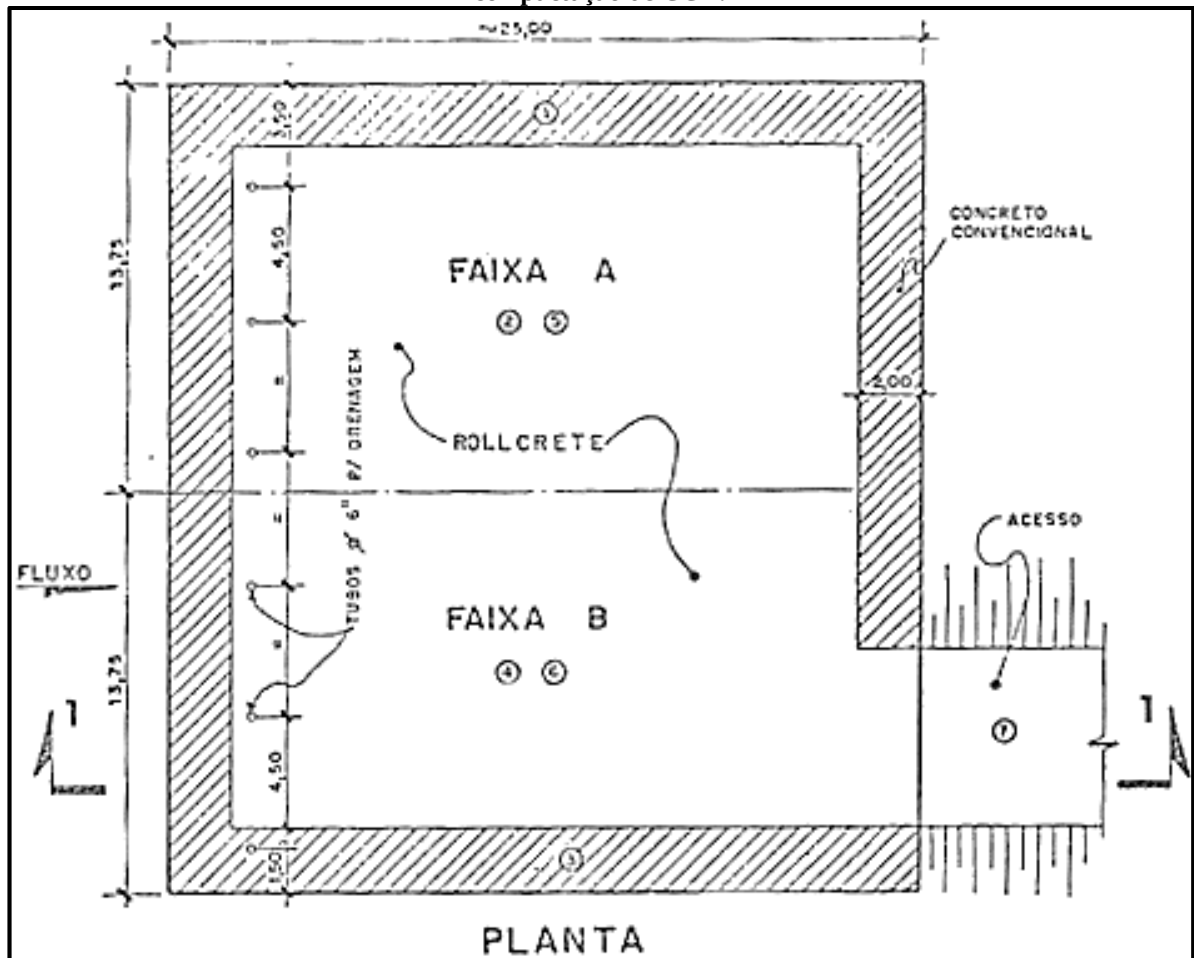
Figura 13 - Corte transversal do Bloco 1-A1, evidenciando as camadas de concretagem nas quais foi utilizado CCR.



Fonte: Pimentel *et al.* (1985).

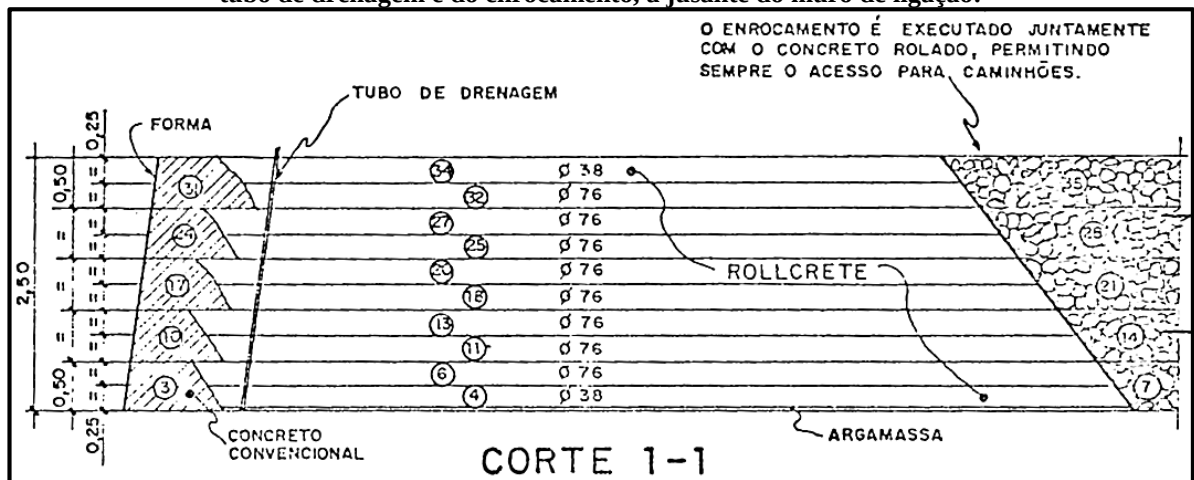
A aplicação de CCR na eclusa se justificou principalmente pelo grande interesse da ELETRONORTE em introduzir essa metodologia construtiva, na época inovadora, no país. Ela se fez possível com a utilização dos equipamentos disponíveis no canteiro de obras, que estavam a serviço da barragem de terra. Como não estava prevista no projeto original, algumas adaptações foram necessárias, servindo de “salvaguardas” de projeto, com o intuito de garantir a qualidade da obra. Entre elas, a execução da “coroa” de CCV em toda a periferia do bloco, com largura de 2,00 m, sendo o núcleo em CCR (Figura 14); e a aplicação de uma linha de drenos a montante do bloco, espaçados de 4,50 m e localizados imediatamente a jusante da linha de contato entre CCV e CCR, como pode ser observado na Figura 15 e na Fotografia 5 (PIMENTEL *et al.*, 1985).

Figura 14 - Planta especificando os locais de aplicação de CCV e CCR (rollcrete), o local de acesso do rolo vibrador e as faixas de trabalho, nas quais havia o revezamento de lançamento, espalhamento e compactação de CCR.



Fonte: Pimentel *et al.* (1985).

Figura 15 - Corte demonstrando os locais de aplicação de CCV e CCR, além de destacar a disposição do tubo de drenagem e do enrocamento, a jusante do muro de ligação.



Fonte: Pimentel *et al.* (1985).

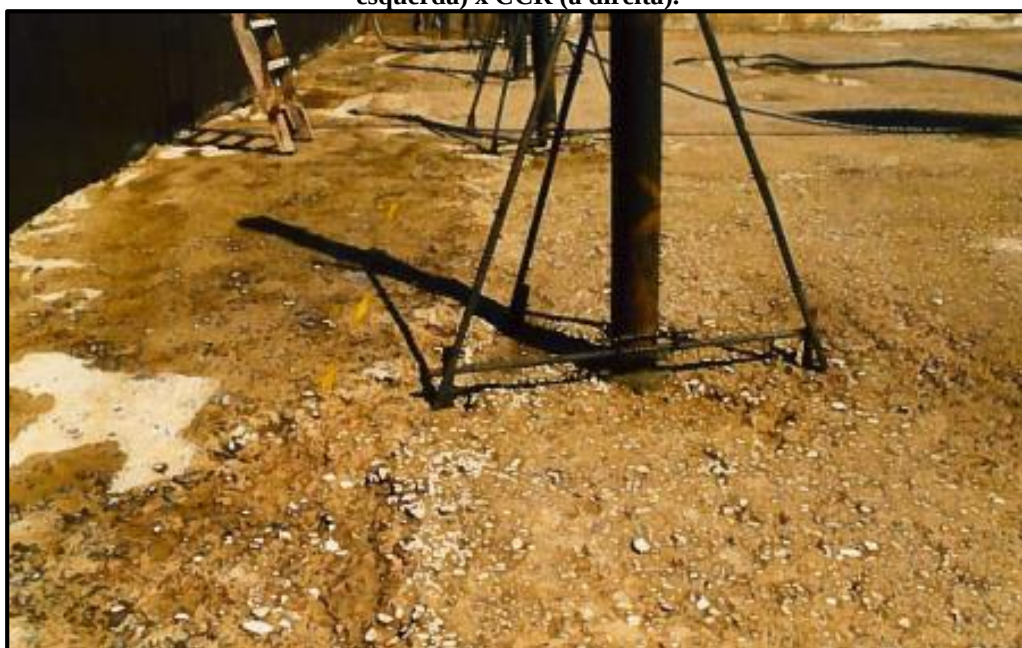
**Fotografia 5 - “Costura” do contato CCV (à direita) x CCR (à esquerda), utilizando vibradores mecânicos.**



**Fonte: Pimentel et al. (1985).**

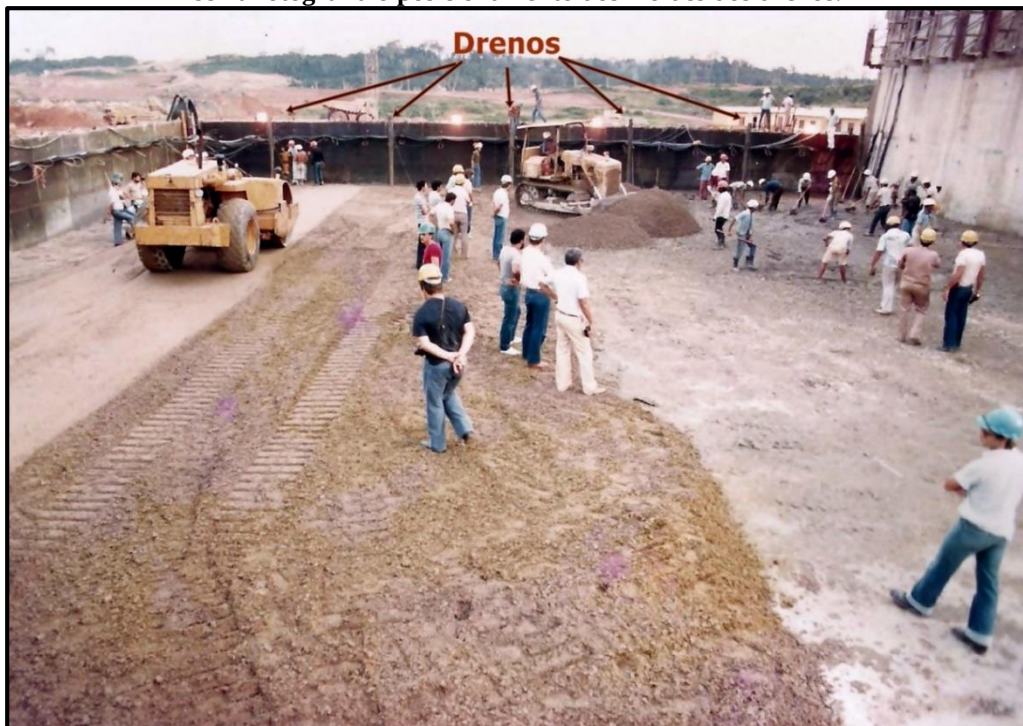
Os tubos de drenagem foram moldados *in loco*, como ilustrado nas Fotografias 6 e 7, com o auxílio de moldes metálicos, que eram retirados após a concretagem. A água que hoje infiltra através do concreto tem como caminho preferencial os vazios representados por esses tubos, cumprindo a finalidade máxima destes, que é proteger o maciço.

**Fotografia 6 - Detalhe do molde metálico do tubo de drenagem, posicionado próximo ao contato CCV (à esquerda) x CCR (à direita).**



**Fonte: Pimentel et al. (1985).**

**Fotografia 7 - Bloco 1-A1, observado de jusante para montante, durante a compactação do CCR. Destaca-se na fotografia o posicionamento dos moldes dos drenos.**



**Fonte: adaptado de Pimentel *et al.* (1985).**

### 3.3.2 Registro fotográfico do local – exposição da patologia

As Fotografias 8, 9, 10 e 11, dispostas nas páginas seguintes, são um breve relato das condições da galeria de drenagem do Bloco 1-A1 da Eclusa 1, evidenciando o grau de desenvolvimento da patologia estudada, antes de qualquer intervenção pela pesquisa.

Em comparação, para que se tenha uma ideia do quanto o problema pesquisado está em nível avançado na galeria de drenagem do Bloco 1-A1, a Fotografia 12 expõe a situação atual da galeria de drenagem do Bloco 1-C1, cujas condições de projeto foram semelhantes às do bloco estudado.

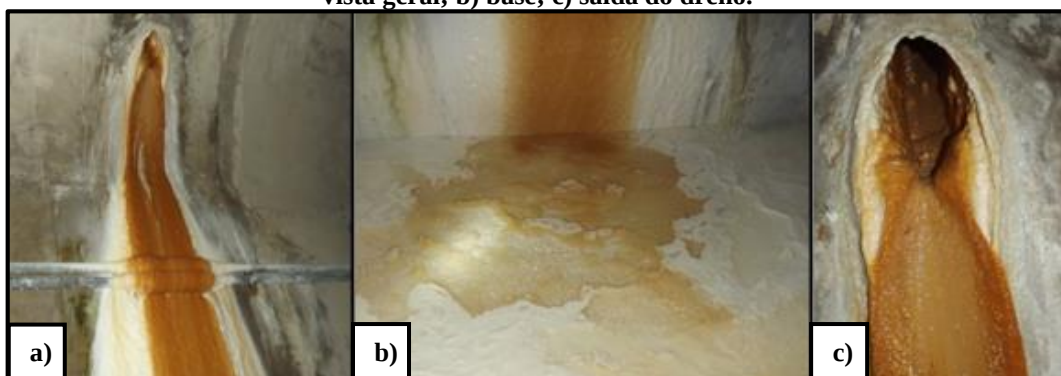
Certamente, considerando que se trata de uma estrutura hidráulica, é normal e inevitável que além do caso analisado existam outras ocorrências pontuais de lixiviação ao longo da estrutura da Eclusa 1. No entanto, são casos considerados simples. Inclusive, em sua maioria, já se encontram colmatados, ou seja, vedados pelo próprio carbonato de cálcio produzido. As Fotografias 13, 14 e 15 ilustram alguns exemplos desses casos.

**Fotografia 8 - Vista geral da galeria de drenagem do Bloco 1-A1, cota 26,50 m, onde é possível observar eflorescências depositadas nas paredes e no piso.**



Fonte: a autora.

**Fotografia 9 - Detalhamento do dreno com maior quantidade de carbonato de cálcio depositada, sendo: a) vista geral; b) base; c) saída do dreno.**



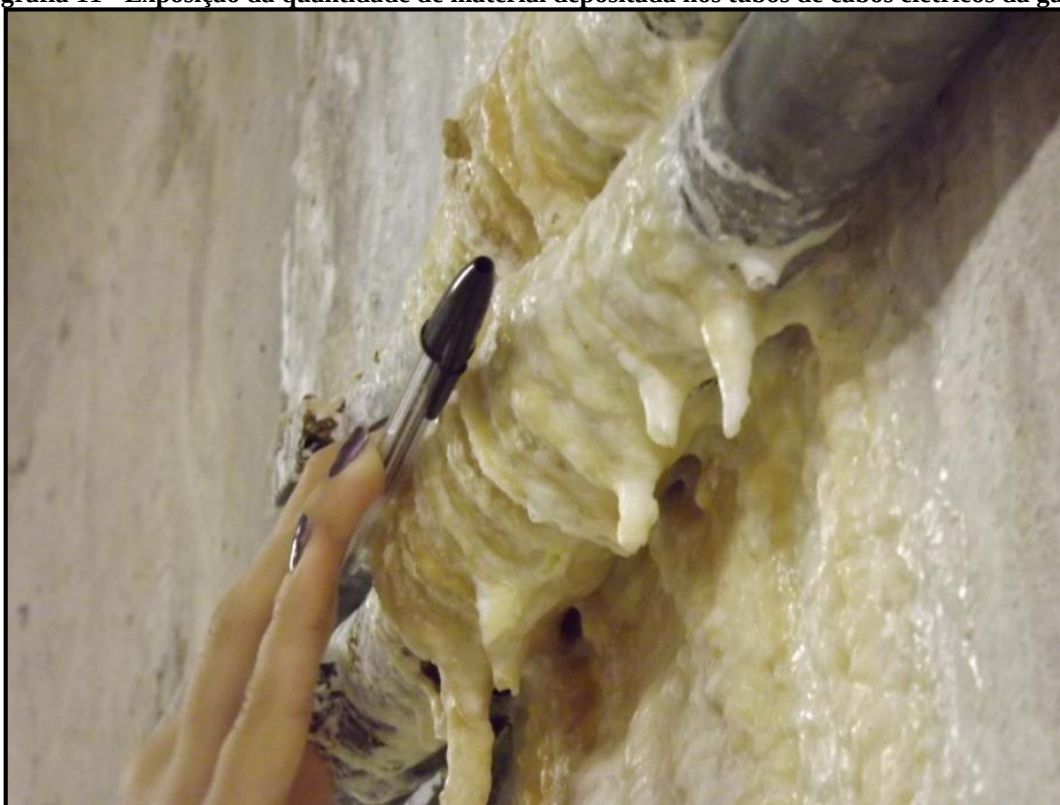
Fonte: a autora.

**Fotografia 10 - Detalhamento de outro dreno, também com grande quantidade de eflorescência, sendo: a) vista geral; b) base; c) saída do dreno.**



Fonte: a autora.

**Fotografia 11 - Exposição da quantidade de material depositada nos tubos de cabos elétricos da galeria.**



**Fonte: a autora.**

**Fotografia 12 - Galeria de drenagem do Bloco 1-C1, cota 26,50 m.**



**Fonte: a autora.**

**Fotografia 13 - Caso pontual de lixiviação na escada localizada sobre o canal de enchimento da Eclusa 1.**



**Fonte: a autora.**

**Fotografia 14 - Em alguns locais nota-se a formação de estalactites no teto na galeria de drenagem, outra comum manifestação da lixiviação.**



**Fonte: a autora.**

**Fotografia 15 - Ocorrência de lixiviação em partes específicas de algumas paredes da galeria de drenagem, especialmente no contato concreto moldado *in loco* (nas paredes) e concreto pré-moldado (na abóbada do teto).**

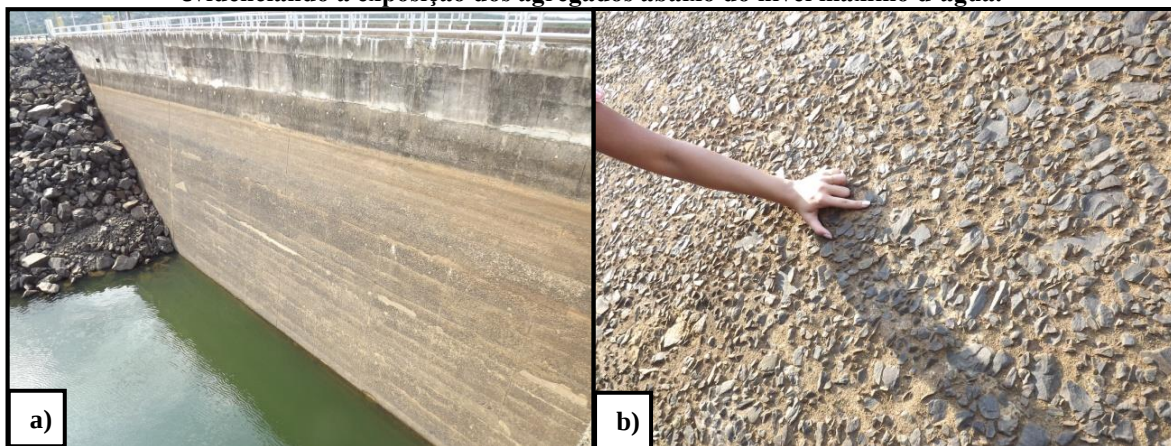


Fonte: a autora.

### 3.3.3 Relato das condições do paramento de montante

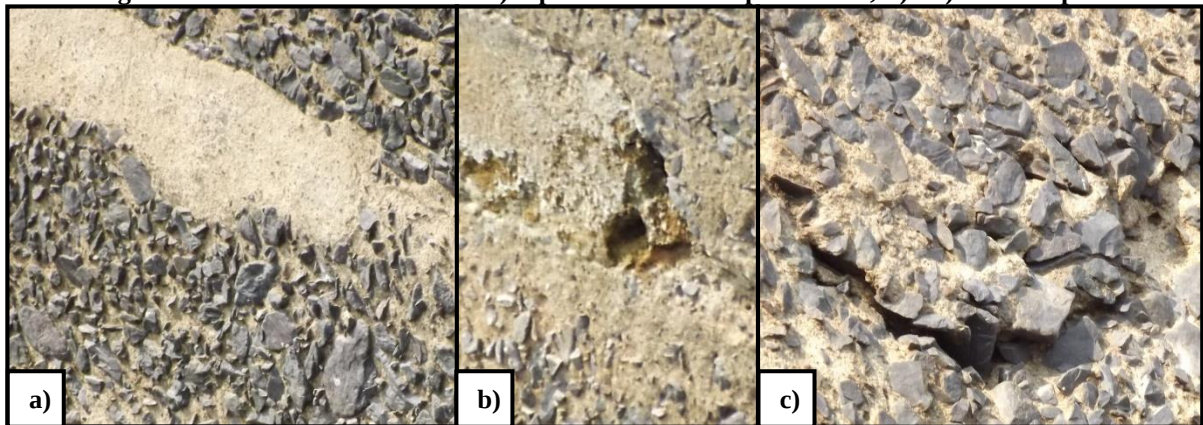
O paramento de montante da Eclusa 1, em especial o lado A do Bloco 1, onde a maioria das análises foram realizadas, conforme será descrito no capítulo seguinte, encontra-se como ilustrado entre as Fotografias 16 e 20.

**Fotografia 16 - Paramento de montante da Eclusa 1, lado A. Onde: a) vista geral; b) vista aproximada, evidenciando a exposição dos agregados abaixo do nível máximo d'água.**



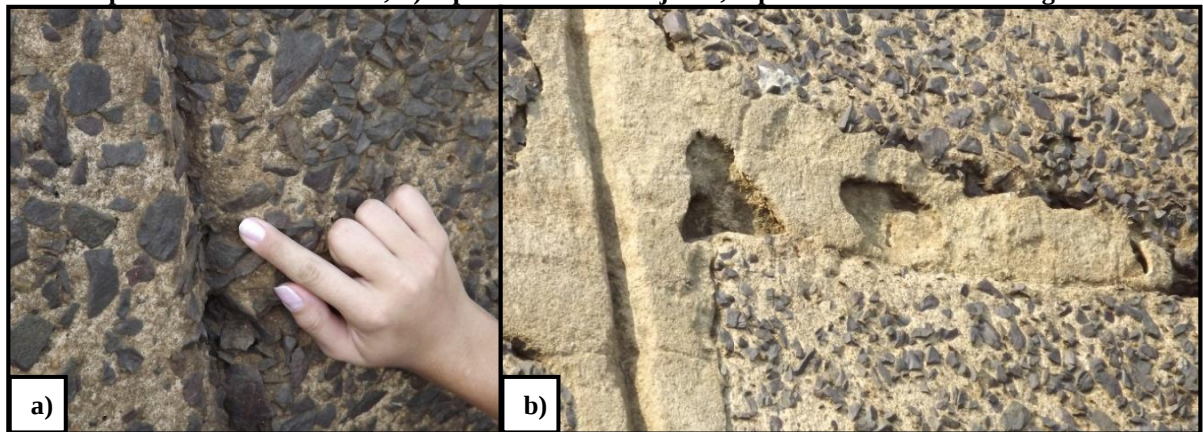
Fonte: a autora.

**Fotografia 17 - Falhas locais. Sendo: a) reparo realizado no paramento; b) e c) falhas expostas.**



Fonte: a autora.

**Fotografia 18 - Detalhamento da junta de dilatação entre os blocos 1-A1 e 1-A2, sendo: a) junta perfeitamente delineada; b) reparo realizado na junta, expondo falhas de concretagem.**



Fonte: a autora.

**Fotografia 19 – Orifício de aproximadamente 10 mm de diâmetro encontrado próximo ao enrocamento, provavelmente causado pela retirada, sem reparo, de um dos fixadores das fôrmas utilizadas durante a concretagem do paramento. Onde: a) vista externa; b) vista do interior.**



Fonte: a autora.

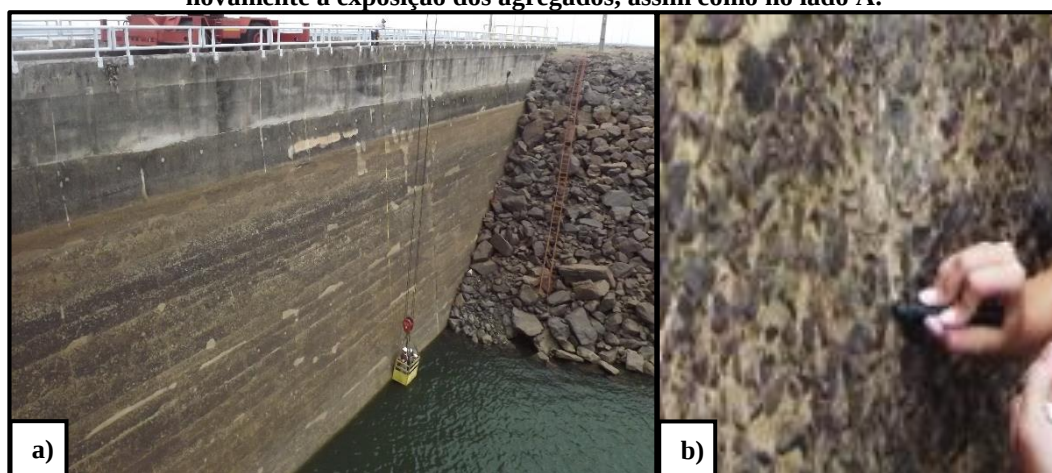
**Fotografia 20 - Demonstração de casos pontuais de lixiviação no paramento.**



**Fonte: a autora.**

A nível de comparação, a Fotografia 21 ilustra o paramento do lado C do Bloco 1, semelhante ao lado A deste bloco, no entanto, disposto do lado contrário da Eclusa 1, como foi possível notar na planta chave, demonstrada na Figura 12.

**Fotografia 21 - Paramento do Bloco 1, lado C, sendo: a) vista geral e b) vista aproximada, evidenciando novamente a exposição dos agregados, assim como no lado A.**

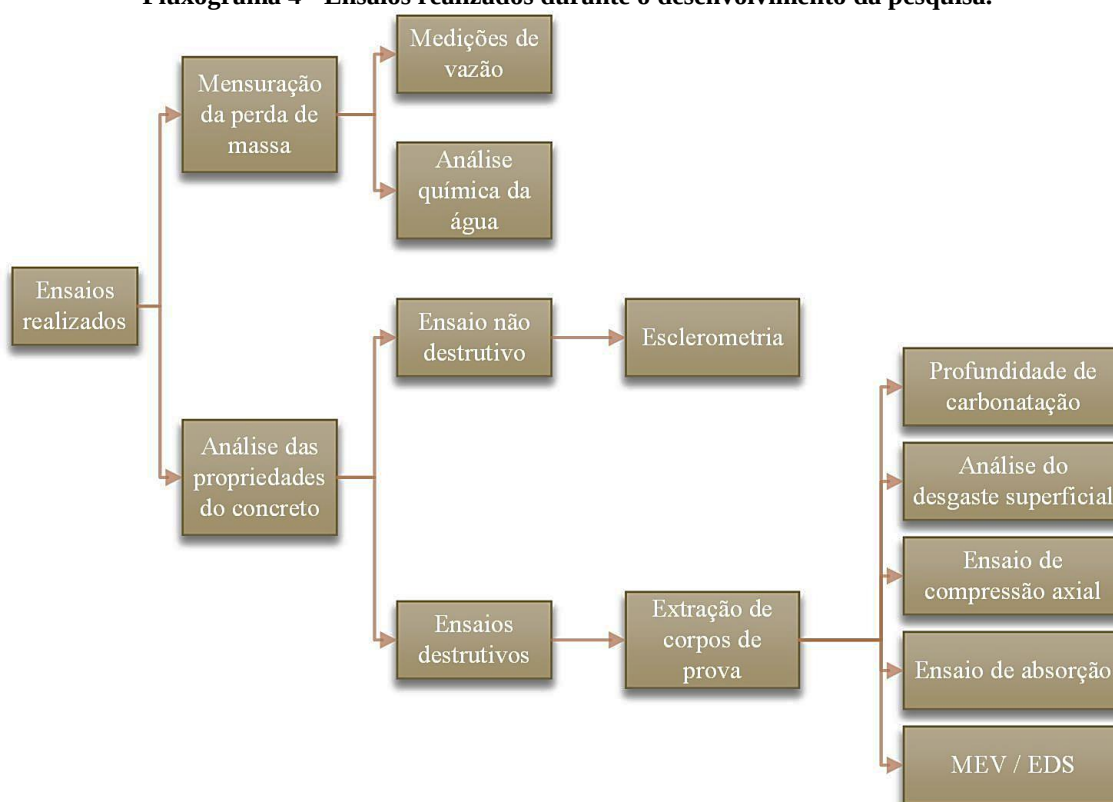


**Fonte: a autora.**

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados, bem como os métodos adotados para o desenvolvimento da presente pesquisa serão descritos nos subcapítulos que seguem. Visando situá-los mais facilmente, o Fluxograma 4 é exposto abaixo, demonstrando um resumo dos ensaios realizados no decorrer do estudo.

**Fluxograma 4 - Ensaios realizados durante o desenvolvimento da pesquisa.**



**Fonte: a autora.**

### 4.1 MENSURAÇÃO DA PERDA DE MASSA

A perda de massa pelo maciço de concreto devido à ocorrência da lixiviação pôde ser mensurada a partir da correlação entre os valores obtidos em medições periódicas de vazão nos drenos onde foram encontradas manifestações mais evidentes da patologia, ou seja, uma elevada quantidade de eflorescência depositada, com os resultados das coletas de água, realizadas tanto no reservatório (água de comparação) quanto nos drenos da galeria de drenagem.

Os procedimentos adotados para as medições de vazão, bem como para as coletas de água, estão explicitados a seguir. Além destes, a técnica de análise utilizada para a

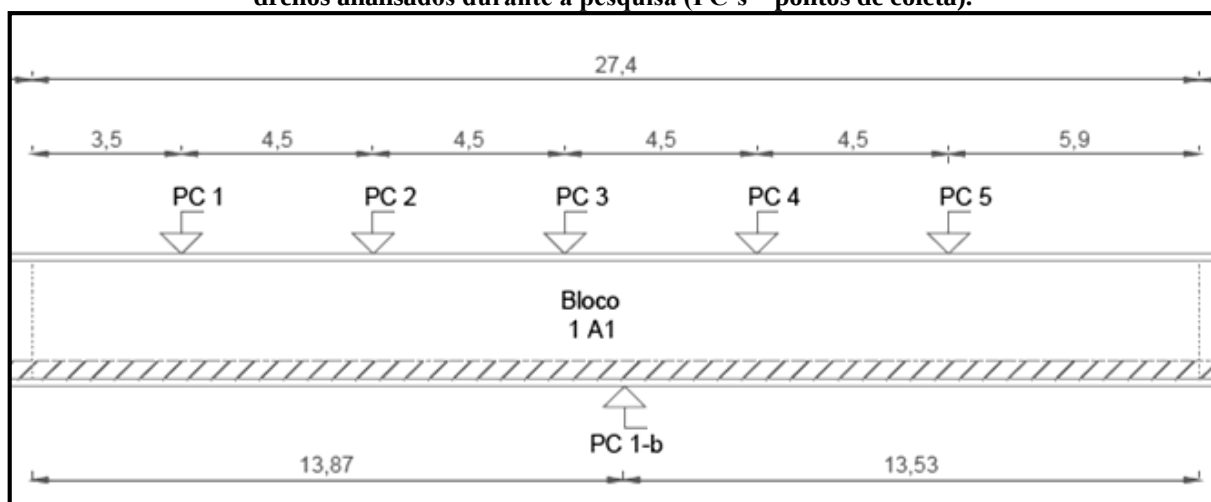
mensuração da perda de massa pelo concreto do Bloco 1-A1 da Eclusa 1, ou seja, a metodologia de cálculo empregada para tanto.

#### 4.1.1 Medições de vazão

Como foi possível observar nas Fotografias 9 e 10, mostradas no capítulo anterior, os drenos que advêm da interface entre CCV e CCR, à montante do muro de ligação, deságuam na parede da galeria de drenagem, fazendo com que a água escorra sobre ela. Isso justifica a intensa formação de crosta branca em sua extensão, bem como no piso da galeria.

Uma vez que a água tinha liberdade para escorrer pela parede, coletá-la e, principalmente, medir sua vazão seriam atividades dificultadas sem uma intervenção adequada. Para tanto, uma das primeiras medidas tomadas de modo a viabilizar a análise da patologia foi à adaptação dos drenos de maior vazão, onde consequentemente pôde-se observar maior quantidade acumulada de carbonato de cálcio. Os drenos selecionados para o estudo da quantidade de perda de massa estão demonstrados na Figura 16.

**Figura 16 – Demonstração em planta baixa da galeria de drenagem do Bloco 1-A1 do posicionamento dos drenos analisados durante a pesquisa (PC's – pontos de coleta).**

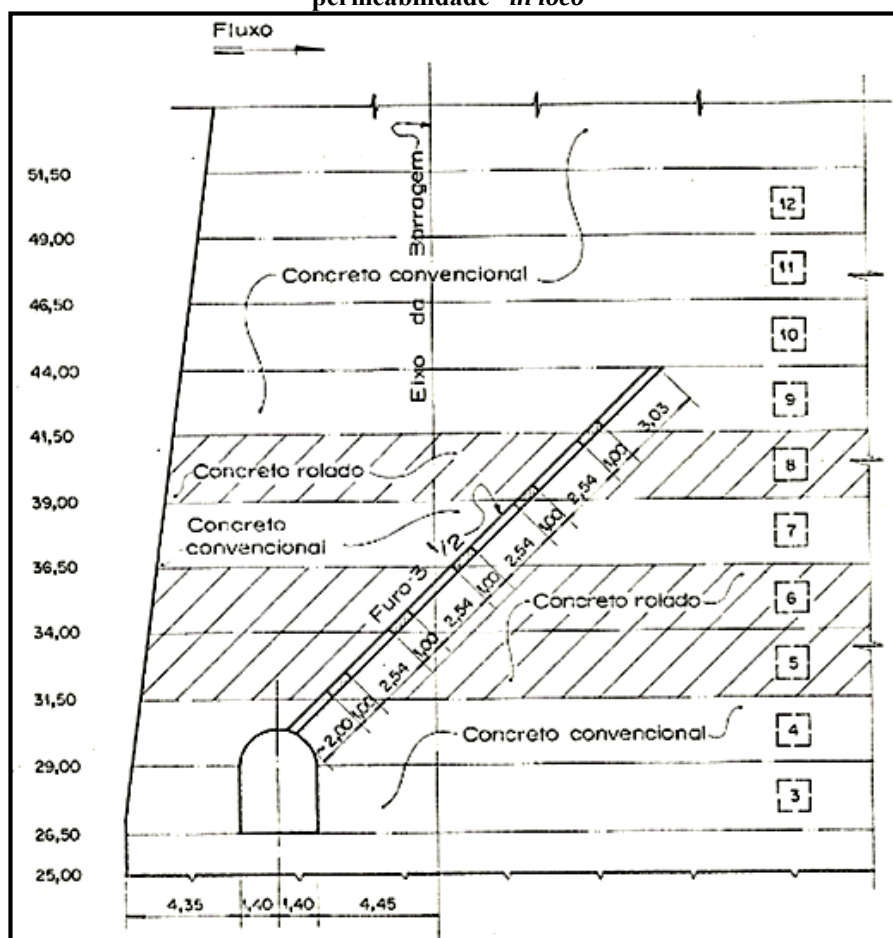


Fonte: a autora.

Foram escolhidos seis drenos, cinco deles advindos do lado de montante do maciço e um sexto, de jusante. É importante ressaltar que à jusante não há contato do paramento com água. No entanto, este dreno específico, aqui denominado 1-b, possui uma vazão relativamente grande, além de constante.

A partir de uma busca por entre arquivos e projetos cedidos pela empresa Eletrobras Eletronorte, constatou-se que o dreno 1-b não é um dreno propriamente dito, mas sim uma perfuração, realizada após a obra que deu origem ao muro de ligação, executada de modo a viabilizar um ensaio *in loco* da permeabilidade do concreto. Sua disposição através do maciço, visto em corte, está ilustrada na Figura 17.

**Figura 17 - Bloco 1-A1, em corte, demonstrando o tubo perfurado para a execução do ensaio de permeabilidade “*in loco*”**



Fonte: Eletro Norte (1982a).

A referida perfuração se estendeu até a camada 9, foi utilizada para o ensaio de permeabilidade do concreto e, posteriormente, não vedada. Ela foi realizada tanto no Bloco A, quanto no Bloco C, semelhante a este primeiro. No Bloco C, o furo originado para o ensaio se encontra seco.

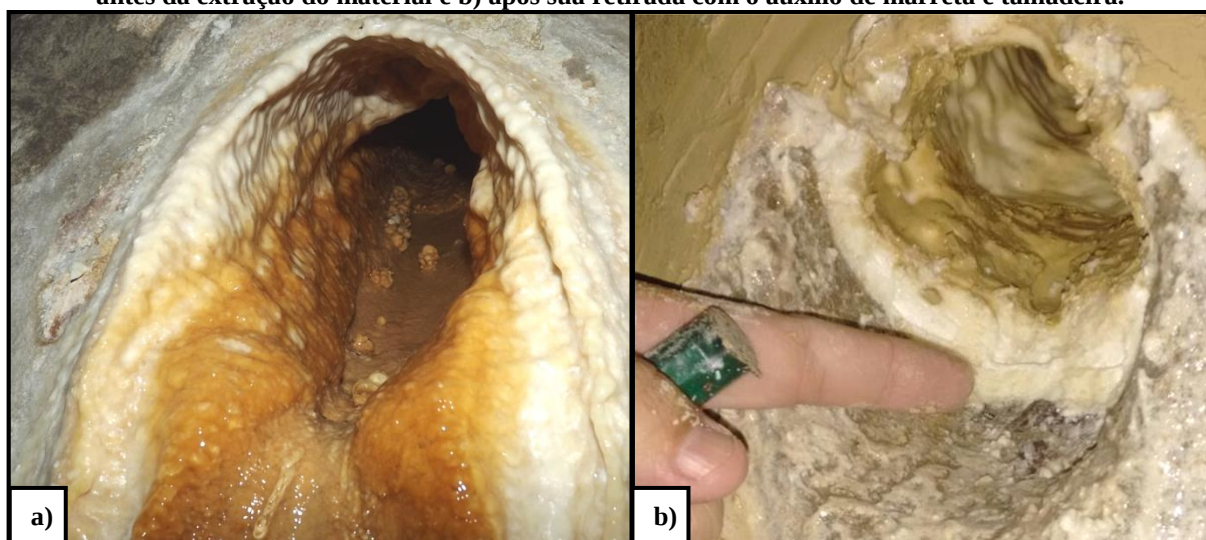
Como é possível inferir, enquanto a água que sai nos cinco drenos da interface CCV/CCR tem que atravessar apenas dois metros de CCV, prioritariamente, (conforme

ilustrado na Figura 11), aquela que deságua no dreno 1-b transpassa uma camada mais extensa de concreto, podendo encontrar ao longo de seu caminho tanto CCV quanto CCR.

Para a realização das adaptações nos drenos, utilizou-se:

- a) Marreta e talhadeira, para a remoção do excesso de material depositado na saída dos drenos, como demonstrado na Fotografia 22;

**Fotografia 22 - Vista aproximada do Dreno 4, ilustrando a quantidade de material depositada. Sendo a) antes da extração do material e b) após sua retirada com o auxílio de marreta e talhadeira.**



**Fonte: a autora.**

- b) Tubos e conexões de PVC, encaixados na saída dos drenos de modo a direcionar o escoamento da água;
- c) Argila, disposta ao redor das conexões e tubos de PVC para a vedação da adaptação.

A Fotografia 23, na página seguinte, ilustra a adaptação pronta, tendo como exemplo o Dreno 4, mostrado anteriormente.

As medições de vazão, por sua vez, partiram da aplicação do método volumétrico, que consiste na verificação do tempo decorrido para que o fluxo de água de cada dreno ocupe determinado volume de um recipiente graduado. Portanto, mede-se por esse procedimento a rapidez com a qual o volume de água é capaz de escoar. Neste caso, o recipiente utilizado foi

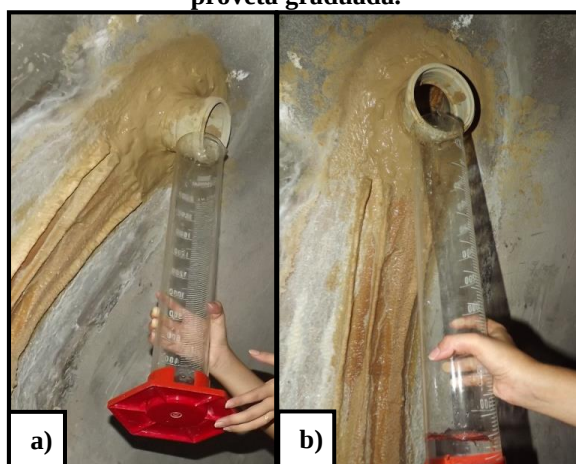
uma proveta graduada de vidro, com capacidade de dois litros (Fotografia 24), e o tempo foi cronometrado com o auxílio de dispositivos eletrônicos, a exemplo: celulares. O valor obtido é medido em volume por tempo.

**Fotografia 23 - Dreno 4, após finalizada a adaptação com conexão de PVC para direcionamento do escoamento de água.**



Fonte: a autora.

**Fotografia 24 – a) e b) Demonstração do momento da realização da medição de vazão, com auxílio de proveta graduada.**



Fonte: a autora.

Por indicação do Sistema Internacional de Unidades (SI), deve-se apresentar vazões em metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). No entanto, para facilitar sua posterior correlação com as concentrações de íons obtidas em análises da água, serão apresentadas vazões em litros por hora (L/h).

As medições ocorreram ao longo de um ano, estendendo-se de junho de 2015 a maio de 2016. A princípio, eram executadas diariamente. Entretanto, notada a reduzida variação diária, sua frequência foi alterada para uma média de uma a duas medições por semana.

O tempo utilizado como referência para as medições varia de dreno para dreno, de acordo com a vazão de cada um. Drenos com maiores vazões permitem medições mais rápidas, em torno de 45 a 75 segundos, enquanto que drenos com vazões inferiores requerem um intervalo maior de tempo, chegando certas vezes até pouco mais de uma hora.

Por controle estatístico, cada dreno tinha sua vazão medida três vezes sequenciais, com exceção daqueles com vazão reduzida, pois estenderia excessivamente o tempo de acompanhamento demandado em cada dia de medição.

#### 4.1.2 Coletas de água

As coletas de água para a análise das substâncias presentes na mesma eram realizadas tanto no reservatório, à montante da Eclusa 1, quanto no interior da galeria de drenagem, colhendo amostras dos próprios drenos estudados, principalmente dos que possuíam maior vazão, o que facilitava o procedimento.

As análises de água, propriamente ditas, foram executadas pelo Laboratório de Limnologia e Qualidade da Água da Eletronorte. As coletas tiveram frequência mensal, tendo como exceções os meses de novembro, dezembro, fevereiro e abril. Os parâmetros físico-químicos analisados na água estão expostos no subcapítulo seguinte.

##### 4.1.2.1 *Parâmetros Físico-Químicos Analisados*

Diversos ensaios foram realizados de modo a obter os parâmetros físico-químicos da água analisada, especialmente os químicos, que influem mais expressivamente na investigação da patologia estudada.

Alguns destes ensaios, a unidade de seus resultados e a metodologia empregada para a sua realização pelo Laboratório de Limnologia e Qualidade da Água da Eletronorte, com o intuito de analisar a água do reservatório (água de comparação), bem como aquela que sai nos drenos da galeria de drenagem da Eclusa 1, estão demonstrados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Alguns dos ensaios realizados nas amostras de água, demonstrando a metodologia para eles utilizada e a unidade de seus resultados.**

| Ensaio                                            | Unidade                 | Metodologia               |
|---------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| pH                                                | -                       | Potenciômetro             |
| Cor                                               | mg de PtCo/L            | Espectrofotometria        |
| Turbidez                                          | NTU                     | Nefelométrico             |
| Condutividade                                     | $\mu\text{S/cm}$        | Potenciometria            |
| Alcalinidade                                      | mg/L de $\text{CaCO}_3$ | Titulação Potenciométrica |
| Ferro Total                                       | mg/L                    | Espectrofotometria        |
| Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )                       | mg/L                    | Titulométrico com EDTA    |
| Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ )                     | mg/L                    | Titulométrico com EDTA    |
| Nitrogênio Amoniacal Ionizado ( $\text{NH}_4^+$ ) | mg/L                    | Espectrofotometria        |

**Fonte:** a autora.

Resumidamente, as metodologias dos ensaios expostas na Tabela 3 podem ser assim descritas:

- a) Potenciômetro ou Potenciometria: método de ensaio que parte da medição da diferença de potencial elétrico de amostras líquidas, estando ausente uma corrente significativa. Por meio dela faz-se possível descobrir informações como a condutividade e o pH de uma solução;
- b) Espectrofotometria: método de análise óptica que faz uso do espectrofotômetro, um equipamento que permite comparar a absorção ou transmissão de radiação entre duas soluções, uma com quantidade conhecida de substância dissolvida e outra com quantidade desconhecida (amostra analisada);
- c) Nefelométrico: compara a intensidade de luz dispersada em uma amostra e em uma referência. A turbidez é considerada maior quanto mais a luz for dispersada;
- d) Titulometria ou titulação: faz-se uso deste procedimento quando o objetivo é determinar a concentração de uma solução por meio de uma análise quantitativa, comparando-a com uma solução padrão de concentração conhecida. Foram utilizados dois tipos de titulometria, entre eles: 1) Potenciométrica, que relaciona o potencial de dois eletrodos, sendo um deles referência e o outro indicador, permitindo encontrar a alcalinidade de uma solução; e 2) com EDTA, um ácido que age como ligante formando compostos estáveis com íons como cálcio e magnésio.

#### 4.1.3 Técnica utilizada para a quantificação

Para a quantificação da perda de massa pelo concreto estudado, foi necessário estabelecer uma correlação sólida entre os resultados das coletas de água e aqueles advindos das medições de vazão.

Quanto às coletas de água, o resultado essencial delas é a diferença entre a quantidade referente a cada item encontrado na água que sai dos drenos e a presente na água do reservatório para o mesmo. Ou seja, o tanto de cada substância que foi retido pelo concreto ou extraído dele. Interessando primordialmente a pesquisa as substâncias extraídas deste material.

As vazões, quando associadas a essas quantidades de substâncias extraídas, permitem estimar a perda de massa pelo concreto em função do tempo. Simplificando esta associação, o cálculo realizado para tanto está disposto na equação (6).

$$m_e = (C_d - C_l) * Q_{mm} \quad (6)$$

Onde “ $m_e$ ” representa a massa extraída do concreto em função de uma certa substância; “ $C_d$ ” é a concentração desta substância na água coletada nos drenos; “ $C_l$ ” a concentração da mesma na água de comparação (lago); e “ $Q_{mm}$ ” a vazão média mensal do dreno observado.

Uma vez que as análises de água, bem como as medições de vazão, foram realizadas ao longo de um ano, buscou-se estimar da forma mais verossímil possível a perda de massa neste período, associando o resultado da coleta de cada dreno a sua respectiva vazão média mensal, como pôde ser observado na equação (6).

Conforme citado no subcapítulo 3.1.2, em alguns meses compreendidos no intervalo da pesquisa não foi possível realizar a análise química de água, sendo necessários alguns tratamentos estatísticos para o preenchimento dos dados faltantes.

Foram relacionadas, para cada dreno, as variáveis “cota do reservatório x concentração iônica” (Teste 1) e “vazão média mensal x concentração iônica” (Teste 2). Em

cada uma destas situações, fez-se uso de gráficos e linhas de tendência, de modo a obter uma equação que convenientemente expressasse a relação entre as variáveis, como será demonstrado no capítulo referente aos resultados.

Neste trabalho, foram aplicadas equações baseadas em regressões polinomiais adotando polinômios de segundo grau, por seu melhor ajuste as variáveis apresentadas, uma vez que não se correlacionam de maneira linear.

A definição da linha de tendência e da equação que representa cada relação foi realizada com o auxílio da ferramenta computacional EXCEL 2016. No entanto, uma formulação polinomial de segundo grau também pode ser obtida por meio da resolução da equação (7).

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \quad (7)$$

Sendo  $y$  a variável dependente que se deseja encontrar, em questão a concentração iônica, e  $x$  a variável independente.

Neste caso, a cota do reservatório e a vazão média mensal de cada dreno foram testadas como variáveis independentes, uma por vez. Os parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  são obtidos pela resolução do sistema de equações lineares de 3ª ordem, demonstrado na equação (8). Nela,  $n$  representa o número de elementos considerados nos conjuntos  $x$  e  $y$ . Ou seja, o número de combinações de valores  $y$  em função de  $x$  dos quais se dispõe para a elaboração da equação.

$$\begin{aligned} (n) \cdot a_0 + (\sum x_i) \cdot a_1 + (\sum x_i^2) \cdot a_2 &= \sum y_i \\ (\sum x_i) \cdot a_0 + (\sum x_i^2) \cdot a_1 + (\sum x_i^3) \cdot a_2 &= \sum x_i y_i \\ (\sum x_i^2) \cdot a_0 + (\sum x_i^3) \cdot a_1 + (\sum x_i^4) \cdot a_2 &= \sum x_i^2 y_i \end{aligned} \quad (8)$$

Para a verificação do grau de associação entre as variáveis relacionadas, fez-se uso do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), uma medida que estabelece a proporção com que uma variável varia em relação a variabilidade de outra, isto é, o quanto a alteração de um dado fator é capaz de acarretar a alteração simultânea de outro. Uma correlação perfeita ( $r^2 = 1$ ) é muito improvável, já que na prática em uma relação entre duas variáveis existem diversos

fatores capazes de influenciar, indo além do que se considera nas formulações (SHIMAKURA, 2006). A equação (9) mostra uma maneira de calcular este coeficiente.

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

Além dos drenos onde foi necessário preencher os dados faltantes por meio de equações elaboradas por regressão, houve também aqueles em que não foram feitas coletas de água para análise química, em questão os drenos 1 e 5, devido a sua reduzida vazão. Neles, a metodologia adotada para cobrir as falhas foi a adoção da média aritmética simples dos resultados dos drenos onde se conhecia as concentrações das substâncias em cada mês. Além da média, foram calculadas a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação entre esses drenos, objetivando notar possíveis discrepâncias acentuadas entre seus resultados.

O preenchimento dos dados faltantes nos resultados das concentrações de substâncias da água de comparação foi possível também através de regressão polinomial, considerando uma relação semelhante ao Teste 1 realizado para os drenos (cota do reservatório x concentração iônica).

Na análise das vazões medidas em cada dreno fez-se uso também de simplificações, utilizando, ao invés dos diversos resultados obtidos em cada mês, apenas a média mensal destes. Para a vazão de cada dreno por mês, verificou-se também variância, desvio padrão e o coeficiente de variação, de modo a avaliar a homogeneidade dos resultados obtidos neste período. As equações (10), (11), (12) e (13), a seguir, demonstram as fórmulas utilizadas para a obtenção da média aritmética ( $\bar{x}$ ), da variância ( $S^2$ ), do desvio padrão ( $S$ ) e do coeficiente de variação ( $CV$ ), respectivamente. Nelas “ $x$ ” representa o valor considerado e “ $n$ ” o número de elementos em um determinado conjunto.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (12)$$

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (13)$$

O coeficiente de variação (CV), demonstrado anteriormente na equação (13), permite classificar um conjunto de valores quanto a sua dispersão. Segundo Gomes (2000), considera-se baixo um CV inferior a 10%, representando, portanto, um conjunto de dados homogêneos; médio, quando entre 10 e 20%; alto, quando entre 20 e 30%; e muito alto quando superior a 30%.

## 4.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Com o intuito de constatar alterações nas propriedades do concreto devido ao desenvolvimento da lixiviação, alguns ensaios foram realizados. Os procedimentos adotados para tanto estão descritos nos subcapítulos a seguir.

### 4.2.1 Ensaio não-destrutivo (Esclerometria)

Considera-se ensaio não-destrutivo aquele que permite analisar um material, sem provocar danos a sua integridade física, química, mecânica e/ou dimensional. Para a avaliação do concreto do paramento de montante do Bloco 1-A1 da Eclusa 1, fez-se uso inicialmente da esclerometria, um ensaio que se adéqua a referida categoria.

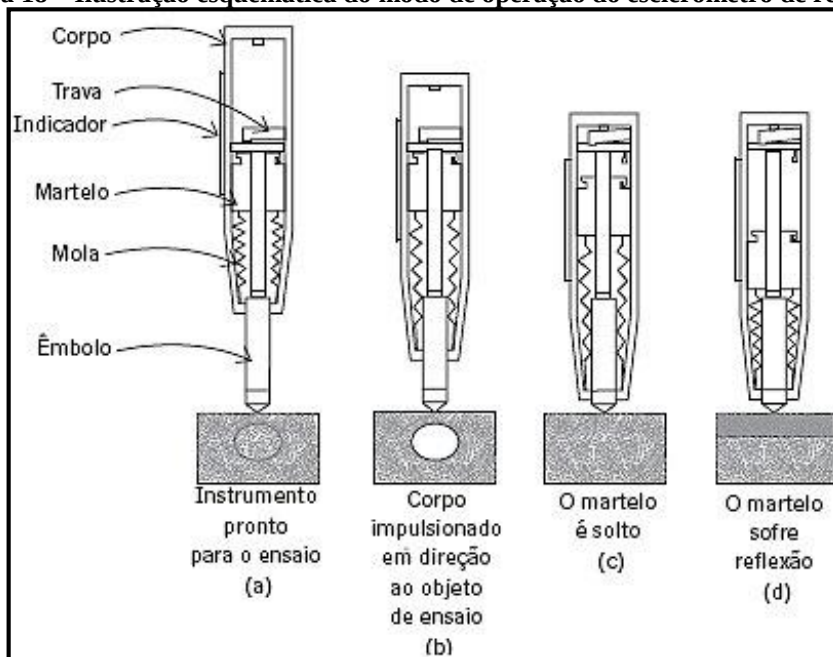
A ABNT NBR 7584:2012 estabelece os critérios necessários a avaliação da dureza superficial do concreto endurecido, valendo-se para isso do uso do esclerômetro de reflexão. Este ensaio é normalmente utilizado de maneira complementar a análise das propriedades de um material, uma vez que oferece informações apenas dos primeiros 20 mm do elemento estudado.

No presente trabalho, utilizou-se da esclerometria para uma estimativa da resistência à compressão do concreto, ou seja, para uma finalidade quantitativa, visando correlacionar a resistência obtida por este método com a dos testemunhos posteriormente extraídos e submetidos ao ensaio de compressão axial. Trata-se de um método simples e de resposta rápida.

Basicamente, o ensaio de esclerometria consiste na imposição do chamado “Martelo de Schmidt” contra a superfície do concreto. Ele será responsável pela aplicação de um

impacto na mesma, tendo sua massa impulsionada por uma mola. Feito isso, deve-se anotar o índice de reflexão do martelo, registrado na escala de medida disposta na lateral do aparelho. A Figura 18 ilustra a sequência de operação do esclerômetro de reflexão.

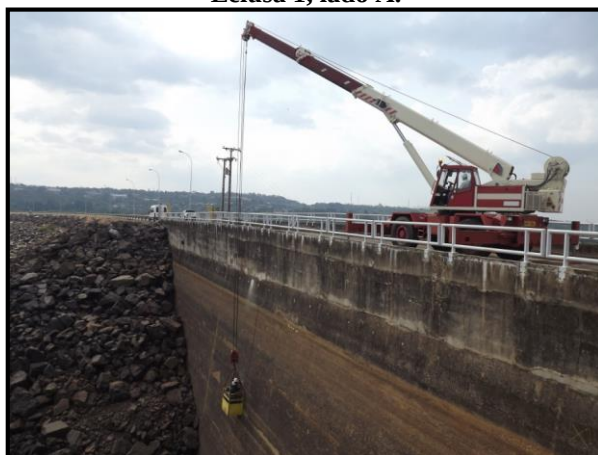
**Figura 18 – Ilustração esquemática do modo de operação do esclerômetro de reflexão.**



**Fonte: Mehta e Monteiro (2008).**

De antemão, vale ressaltar que, na execução de todos os ensaios previstos que envolviam acesso ao paramento contou-se com o auxílio de um guindaste com gaiola, cedido pela Eletrobras Eletronorte para a realização da pesquisa. O conjunto está ilustrado na Fotografia 25.

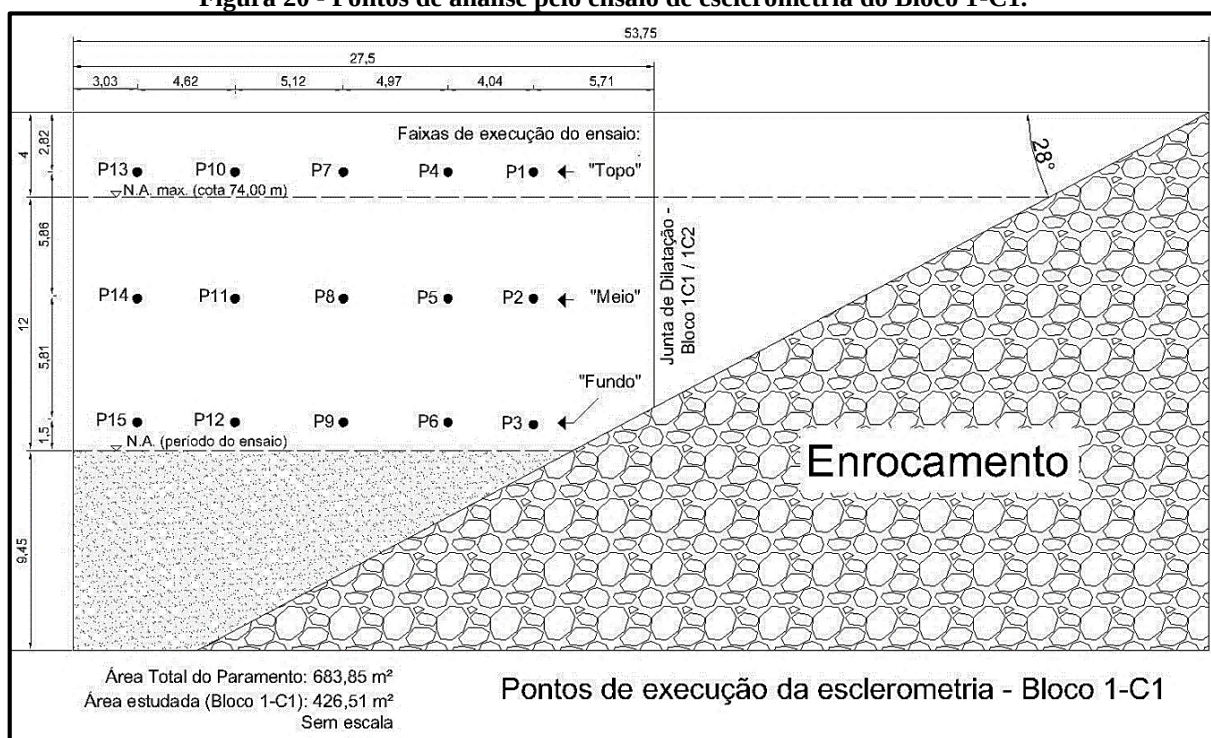
**Fotografia 25 - Demonstração do conjunto guindaste – gaiola em operação no paramento de montante da Eclusa 1, lado A.**



**Fonte: a autora.**



**Figura 20 - Pontos de análise pelo ensaio de esclerometria do Bloco 1-C1.**



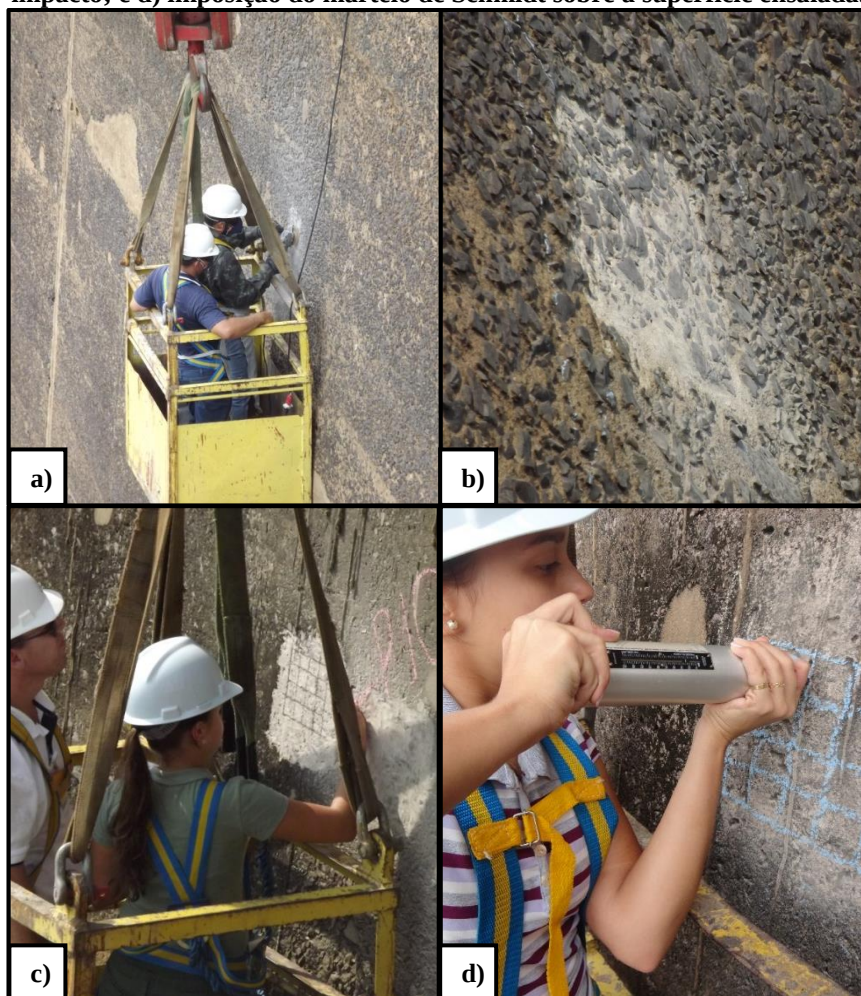
Fonte: a autora.

Para a realização do ensaio, foi a princípio necessário regularizar a superfície do paramento nos pontos analisados, extremamente rugosa em alguns locais devido à exposição dos agregados do concreto. Utilizou-se uma lixa mecânica e, em alguns casos, foi suficiente lixar a mão.

Na sequência, a superfície foi limpa, retirando toda poeira e pó proveniente do lixamento, e nela foram marcados 16 quadrados em uma área de 20 x 20 (cm). Para cada quadrado, foi aplicado um impacto. Por indicação da ABNT NBR 7584: 2012, não se pode repetir o impacto em um mesmo ponto, nem realizar impactos em pontos com distância inferior a 30 mm. A Fotografia 26, na página seguinte, ilustra o passo-a-passo adotado para a realização do ensaio.

O esclerômetro utilizado é do modelo H-2975, marca Schmidt, número de fabricação 144555, tipo N, com energia de impacto de 2,207 N.m, indicado para ensaio não destrutivo em estruturas prontas de concreto, principalmente estruturas comuns e construções de pontes.

**Fotografia 26 – Passo-a-passo adotado para a realização do ensaio de esclerometria. Onde: a) lixamento da superfície; b) demonstração da superfície lixada; c) marcação dos 16 quadrados para aplicação de impacto; e d) imposição do martelo de Schmidt sobre a superfície ensaiada.**



**Fonte: a autora.**

Para a análise dos resultados, a ABNT NBR 7584:2012 indica que seja calculada a média aritmética dos índices esclerométricos obtidos para cada área de ensaio, desprezando todo aquele que se desviar em mais que 10% do valor médio obtido. Segundo esta norma, não se pode considerar um índice esclerométrico médio obtido com menos do que cinco valores individuais, ou seja, quando não sobra mais do que cinco resultados de uma dada área de análise, a mesma deve ser abandonada.

Vale ainda observar que, em todos os pontos de estudo, o esclerômetro trabalhou na horizontal, dispensando a utilização de coeficiente de correção devido a posição do aparelho (adotada sempre que este trabalha em posição diferente da horizontal). Tendo conhecimento do índice esclerométrico médio (IE), deve-se calcular o índice esclerométrico efetivo ( $IE_e$ ) da área de ensaio, determinado pela equação (14).

$$IE_e = k \cdot IE \quad (14)$$

Onde  $k$  representa o coeficiente de correção do índice esclerométrico, obtido por meio da aferição do aparelho. A aferição é feita com o auxílio de uma bigorna de aço padronizada, sobre a qual devem ser aplicados pelo menos dez golpes, cujos resultados não devem diferir do índice esclerométrico médio em  $\pm 3$ , nem ter média inferior a 75. O cálculo de  $k$  pode ser realizado através da equação (15), sugerida pela ABNT NBR 7584:2012.

$$k = n \cdot \frac{IE_{nom}}{\sum_1^n IE} \quad (15)$$

Sendo  $n$  igual ao número de impactos realizados na bigorna de aço,  $IE_{nom}$  o índice esclerométrico nominal do aparelho da bigorna de aço, fornecido pelo fabricante (neste caso,  $IE_{nom} = 72$ ), e  $IE$  o índice esclerométrico alcançado em cada impacto do esclerômetro na bigorna.

Com base em tais procedimentos, foram aplicados quinze golpes na bigorna de aço e, com os resultados obtidos, o coeficiente de correção foi calculado, fazendo uso da equação (15), conforme detalhado abaixo. A partir dela obteve-se  $k = 0,93$ .

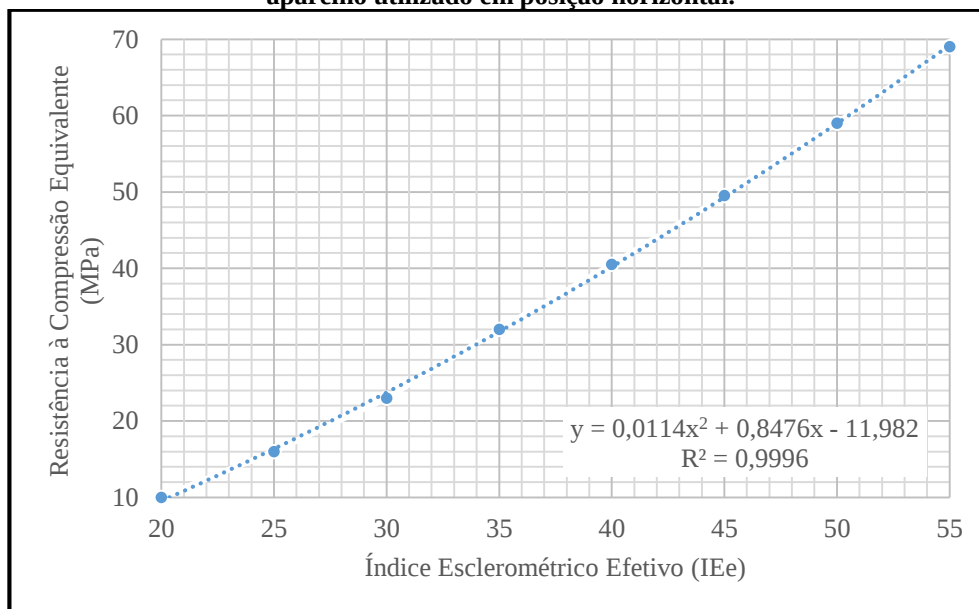
$$k = 15 \cdot \frac{72}{4*77+3*78+4*76+4*79} ; k = 0,93$$

Em posse do  $IE_e$ , fez-se possível descobrir a resistência à compressão equivalente do concreto, na qual está pautado o interesse da realização deste ensaio. Por meio de um gráfico fornecido pelo fabricante do esclerômetro e presente na lateral do aparelho, obtém-se a resistência correspondente ao  $IE_e$  encontrado para cada área de ensaio. Nele existem três linhas de correlação, para este trabalho foi utilizada a linha central, que representa a aplicação do equipamento na posição horizontal.

Ao coletar as coordenadas de alguns pontos desta linha, fez-se possível reproduzi-la no EXCEL, visando a obtenção da equação da curva e uma maior facilidade posterior na correlação entre índice esclerométrico efetivo encontrado em campo e resistência à compressão do concreto. O Gráfico 1 mostra a linha citada plotada, bem como sua equação,

gerada por meio de regressão polinomial de segundo grau, e o coeficiente de determinação entre as variáveis envolvidas.

**Gráfico 1 - Índice Esclerométrico Efetivo (IEe) x Resistência à Compressão Equivalente (MPa), para aparelho utilizado em posição horizontal.**



**Fonte: a autora.**

Pelo uso da equação demonstrada no Gráfico 1, fez-se possível chegar a resistência à compressão equivalente estimada do concreto analisado, tanto no Bloco 1-A1, quanto no Bloco 1-C1 da Eclusa 1, como será apresentado no capítulo 5, referente aos resultados da pesquisa.

#### 4.2.2 Extração de corpos de prova (ABNT NBR 7680-1:2015)

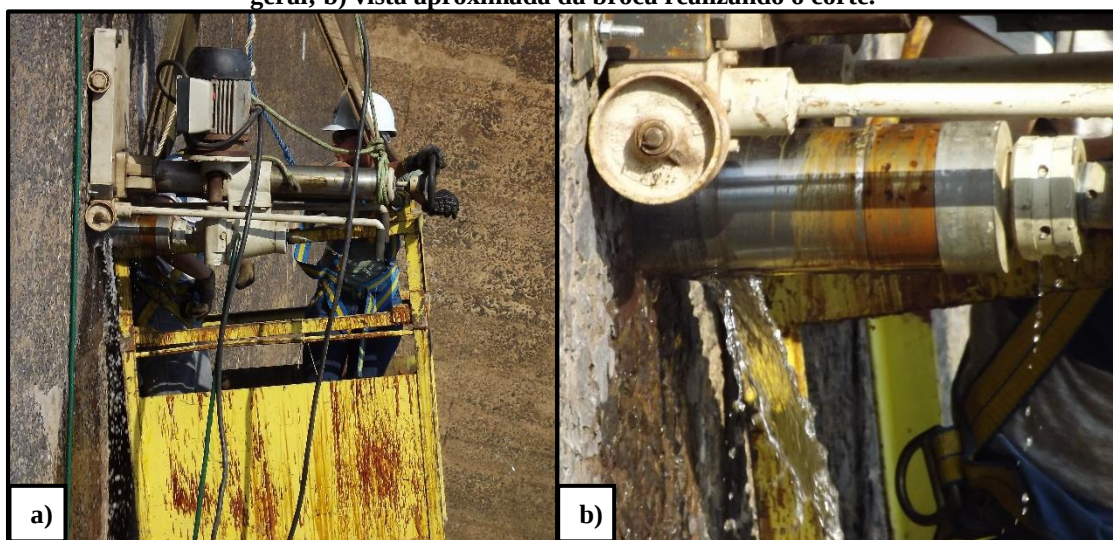
A extração, bem como o preparo, o ensaio e a análise de corpos de prova de estruturas de concreto, visando a verificação de sua resistência à compressão axial, é normalizada pela ABNT NBR 7680-1:2015. Extrações se caracterizam como ensaio destrutivo, uma vez que intervém na integridade física do material para analisa-lo.

Para a execução da extração de testemunhos de concreto faz-se necessário o uso de extratora provida de cálice e coroa diamantada, capaz de permitir a obtenção de corpos-de-prova fisicamente homogêneos e íntegros. A máquina extratora utilizada para o desenvolvimento desta atividade é da marca EMIC e possui broca de 100 mm de diâmetro.

De modo a fixar o equipamento no paramento, em posição ortogonal a que costuma trabalhar (normalmente utilizada na vertical, a extratora teve que ser usada na horizontal), foram empregados chumbadores parabolt e chapas de aço. Antes de sua fixação, foram demarcados os pontos de inserção dos chumbadores e realizadas as aberturas com o auxílio de furadeira.

Fixado o equipamento, bastou ligá-lo a energia e mantê-lo com alimentação constante de água, que facilita o corte, além de arrefecer a broca. A velocidade de inserção da broca no paramento foi controlada manualmente. A Fotografia 27 demonstra a extratora em operação.

**Fotografia 27 - Extratora fixada no paramento da Eclusa 1, lado A, em operação. Sendo: a) disposição geral; b) vista aproximada da broca realizando o corte.**



**Fonte: a autora.**

Por recomendação da ABNT NBR 7680-1:2015, os testemunhos não devem ser extraídos a uma distância menor que o diâmetro de um corpo-de-prova entre suas bordas de perfuração. Portanto, deve-se obedecer a distância mínima de duas vezes o diâmetro do testemunho entre os eixos de extrações próximas.

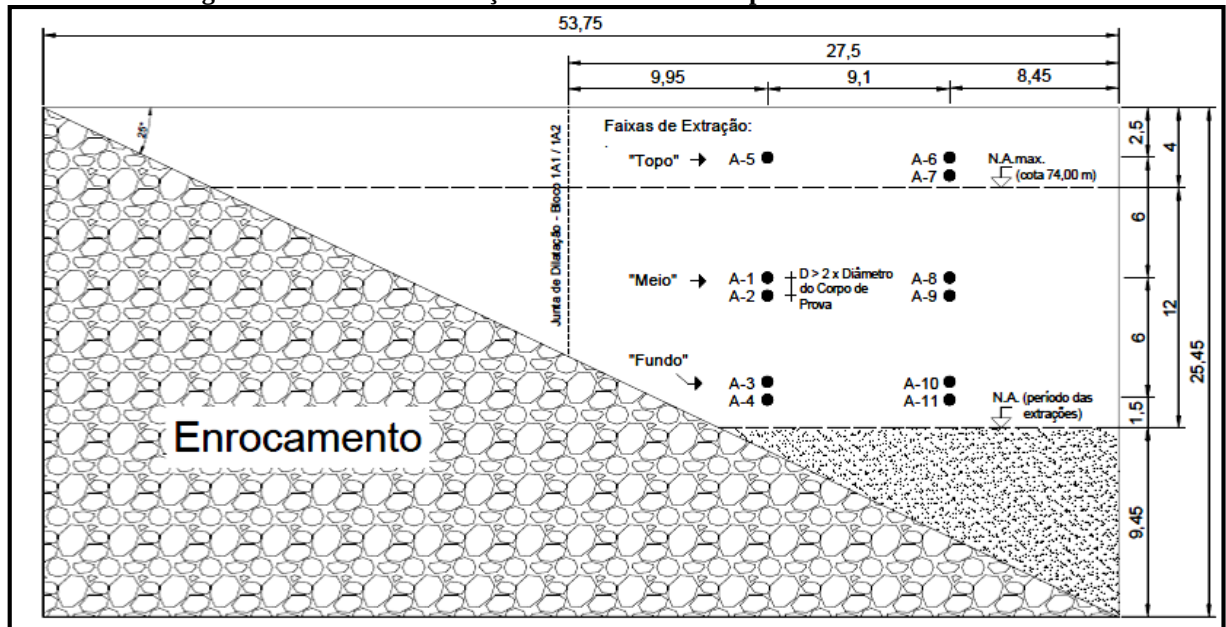
Ainda por prescrição normativa, o diâmetro do testemunho cilíndrico a ser utilizado em ensaio de resistência à compressão axial deveria ser pelo menos três vezes a DMC do agregado graúdo presente no concreto estudado. Conforme citado anteriormente, no subcapítulo 3.3.1 o DMC do concreto do paramento equivale a 76 mm, o que exigiria

extrações de pelo menos 228 mm de diâmetro. No entanto, por indisponibilidade de um equipamento com broca de tais dimensões, não se fez possível seguir tal indicação.

Devido a inexistência de armadura nas proximidades da superfície do paramento, constatada nos projetos e em fotos do tempo da concretagem do bloco analisado, não se fez necessário utilizar outros equipamentos, como ultrassom e pacômetro, para a verificação do posicionamento da armadura, de modo a evita-la durante a extração.

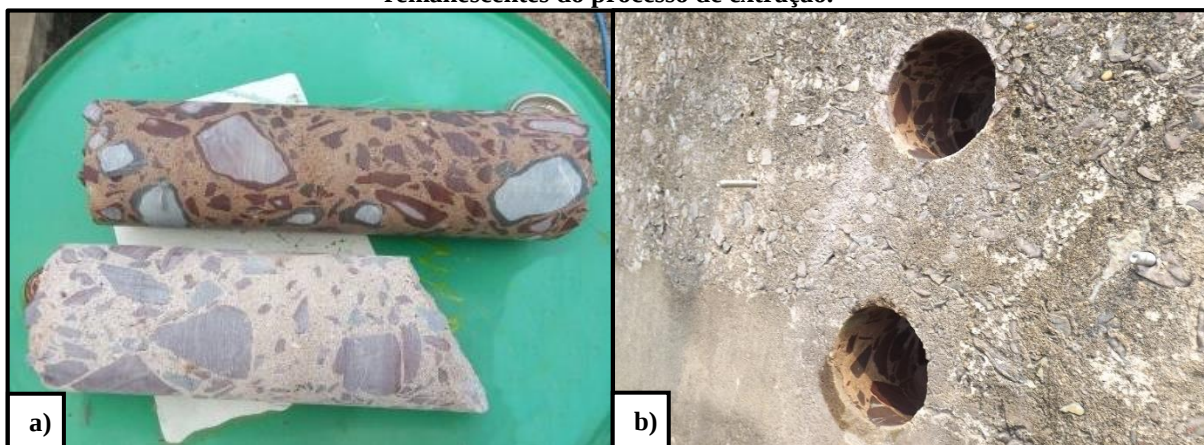
No total, executaram-se onze extrações no paramento do Bloco 1-A1, em novembro de 2015, dispostas conforme pode ser observado na Figura 21. No Bloco 1-C1, por sua vez, não puderam ser realizadas extrações, devido a condições adversas encontradas no período, tais como a ausência de fonte de alimentação de água nas proximidades, indisponibilidade do guindaste e, principalmente, a elevação do nível do lago, que ultrapassou os primeiros pontos de análise. Na Fotografia 28 estão demonstrados alguns testemunhos extraídos e os orifícios remanescentes da extração.

**Figura 21 - Pontos de extração de testemunhos no paramento do Bloco 1-A1.**



Fonte: a autora.

**Fotografia 28 - Demonstração do "pós-extração", sendo: a) testemunhos recém extraídos e b) orifícios remanescentes do processo de extração.**



**Fonte: a autora.**

Pouco após a realização das extrações, foi necessário reparar os locais afetados pelos furos (Fotografia 28-b), de modo a resguardar o desempenho e a durabilidade da estrutura. Este reparo teve como condição mínima reestabelecer as condições iniciais do material empregado no local. Ele foi executado utilizando por base os traços para a argamassa e para a ponte de aderência (melechete) propostos por Andrade (2010) para reparos de pequenos volumes, demonstrados na Tabela 4. O Anexo C da ABNT NBR 7680-1:2015 também dispõe sobre o reparo dos locais de extração.

**Tabela 4 - Traços utilizados na execução do reparo, para a argamassa e para a ponte de aderência (melechete).**

| <b>Material</b>             | <b>Argamassa</b>                          | <b>Melechete</b>    |
|-----------------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| Cimento                     | 14,0 (l) ou 16,0 (kg)                     | 7,0 (l) ou 8,0 (kg) |
| Silica Ativa ou Metecaulim  | 2,8 (l) ou 2,4 (kg)                       | 1,4 (l) ou 1,0 (kg) |
| Areia Natural Peneirada (*) | 25,3 (l) ou 38,0 (kg)                     | -                   |
| Água                        | Até consistência seca com coesão (manual) | 4,0(l)              |

**Fonte:** Andrade (2010).

Inicialmente, fez-se necessário limpar a superfície dos orifícios onde foram realizadas as extrações, de modo a retirar o excesso de pó. Então, foi disposta a ponte de aderência (melechete), uma mistura bem fluida, aplicada com o intuito de garantir a ligação entre o substrato e a argamassa de reparo, colocada aos poucos no furo, seguida de adensamento, após esta ponte.

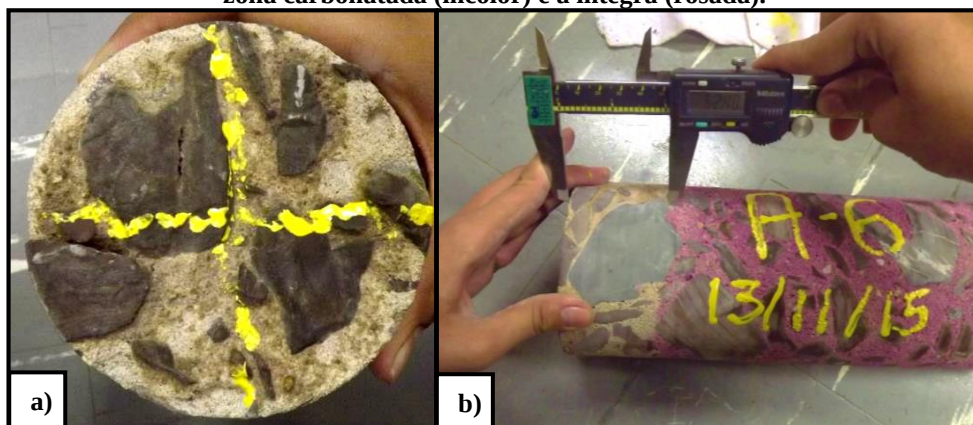
#### 4.2.2.1 Determinação da profundidade de carbonatação e estimativa do desgaste superficial

Para a determinação da profundidade de carbonatação dos testemunhos extraídos do paramento do Bloco 1-A1 do Muro de Ligação da Eclusa 1, fez-se necessário utilizar solução de fenolftaleína ( $C_{20}H_{14}O_4$ ) a 1% (massa/volume) como indicador ácido-base, preparada na proporção de 1g de fenolftaleína para 100 mL de álcool etílico ( $C_2H_5OH$ ) a 95% (volume de álcool/volume da mistura de água e álcool etílico). Esta solução passa de incolor para vermelha em soluções fortemente básicas, normalmente virando de cor no intervalo entre pH 8,2 e 9,8 (DOU, 2006).

O concreto, com pH normal entre 12,5 e 13,5, tende naturalmente a ficar avermelhado ao receber borrifadas da solução citada. No entanto, devido ao desenvolvimento no mesmo da reação de carbonatação, a região carbonatada, cujo pH é drasticamente reduzido, se mantém incolor.

Para a medição da profundidade de carbonatação e, portanto, da extensão da região que se manteve incolor após o contato com a solução de fenolftaleína, fez-se uso de um paquímetro, marca Mitutoyo, modelo CD-8'' CS-B. Com este equipamento, foram verificados quatro pontos equidistantes, indicados com auxílio de marcador industrial na base dos corpos de prova. Dos quatro valores encontrados extraiu-se a média aritmética comum e o desvio padrão, considerando a carbonatação da área analisada igual a média obtida na mesma. A Fotografia 29 ilustra o processo de medição da profundidade de carbonatação dos testemunhos extraídos.

**Fotografia 29 - Medição da profundidade de carbonatação. Onde: a) marcação dos quatro pontos equidistantes e b) utilização do paquímetro, valendo ressaltar a evidente diferença de coloração entre a zona carbonatada (incolor) e a íntegra (rosada).**



Fonte: a autora.

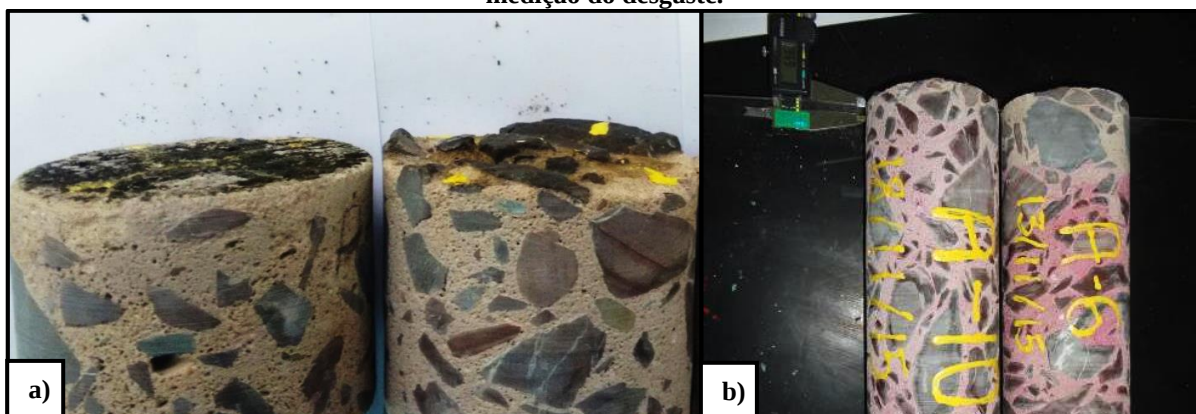
Quanto ao do desgaste superficial do paramento, melhor ilustrado no subcapítulo 3.3.3, houve uma quantificação empírica de sua extensão.

Partindo do pressuposto de que o concreto íntegro possui argamassa suficiente envolvendo seus agregados, expondo-os minimamente, quantificou-se, também com o auxílio do paquímetro, a exposição dos agregados nas proximidades da superfície dos corpos de prova extraídos abaixo do nível máximo d'água (cota 74,00 m), usando como elementos de comparação / referência aqueles extraídos acima deste nível (testemunhos A-5, A-6 e A-7).

Em outras palavras, os testemunhos analisado e de referência foram colocados lado a lado, utilizando uma superfície plana (neste caso uma régua metálica) para nivelar suas superfícies. Então, foi medida a distância entre o cume dos agregados expostos do testemunho analisado e o início da argamassa que deveria estar envolvendo-o, em quatro pontos equidistantes. O resultado do desgaste superficial de cada corpo de prova extraído abaixo do nível d'água foi igual a média destes valores.

A Fotografia 30 demonstra a facilmente identificável diferença entre a superfície do paramento acima e abaixo do nível máximo d'água, através dos testemunhos apresentados (a), bem como ilustra o processo adotado para a medição do desgaste superficial (b).

**Fotografia 30 - Desgaste superficial dos testemunhos. Onde: a) a esquerda, um corpo de prova extraído acima do nível máximo de água (referência) e, a direita, um extraído abaixo deste nível (analisado), exemplificando o notável desgaste e exposição dos agregados; e b) demonstração do processo empírico de medição do desgaste.**

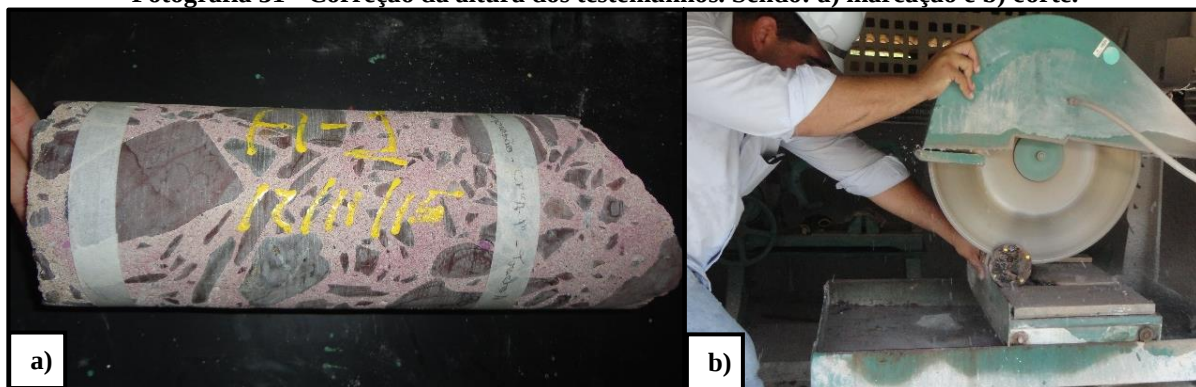


Fonte: a autora.

#### 4.2.2.2 Teste de resistência

Conforme recomendado na ABNT NBR 7680-1:2015, para a correção da altura dos testemunhos, deixando-a igual ao dobro da base dos mesmos (100 mm), bem como para a obtenção de paralelismo entre seus os topos, deve ser realizado o corte das amostras, preferencialmente utilizando serra diamantada com refrigeração à água. Este procedimento foi executado, como pode ser observado na Fotografia 31.

**Fotografia 31 - Correção da altura dos testemunhos. Sendo: a) marcação e b) corte.**



**Fonte: a autora.**

Após o corte, cada testemunho foi pesado e medido, de modo a permitir o cálculo de sua massa específica, a partir da divisão da massa pelo volume dos mesmos. Eles passaram então 72h em câmara úmida, de modo que fossem rompidos saturados, em condição crítica.

Feito isso, tiveram seus topos regularizados por meio do processo de capeamento. Este consiste no revestimento dos topos dos corpos-de-prova com uma fina camada de enxofre derretido (neste caso, este foi o material escolhido para capear), conferindo a eles um acabamento liso e com superfície devidamente perpendicular ao centro do testemunho, seguindo as instruções da ABNT NBR 5738:2015. A Fotografia 32, disposta na página seguinte, mostra alguns dos corpos de prova após serem capeados.

A determinação da resistência à compressão do concreto foi possível através do ensaio com prensa hidráulica, feito em uma máquina universal de ensaio de materiais, marca Wolpert, tipo 300 D 74, ano 1979, disponível no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, Campus de Tucuruí.

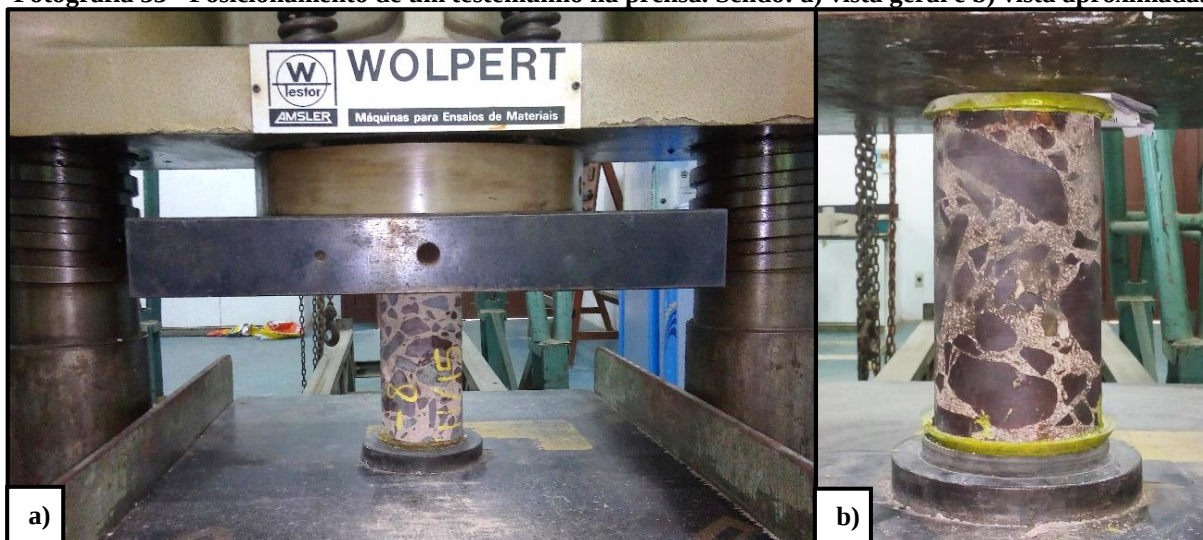
**Fotografia 32 - Alguns dos testemunhos extraídos, após corte e capeamento.**



**Fonte: a autora.**

Respeitando as determinações da ABNT NBR 5739:2007, cada corpo-de-prova foi cuidadosamente posicionado no centro do prato inferior da máquina e recebeu carregamento de maneira contínua e sem choques, cessando apenas quando houve queda de força, o que indica a ruptura do testemunho. Todas as onze amostras extraídas passaram por teste de resistência. A Fotografia 33 demonstra o posicionamento de um dos testemunhos na prensa.

**Fotografia 33 - Posicionamento de um testemunho na prensa. Sendo: a) vista geral e b) vista aproximada.**



**Fonte: a autora.**

O programa disponível na própria prensa já fornece a tensão de ruptura, em MPa, considerando o tamanho do corpo-de-prova para ele informado. Os resultados foram

analisados estatisticamente com base na média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada faixa de análise (topo, meio e fundo).

Antes do tratamento estatístico, no entanto, foi aplicado ao valor de tensão obtido pelo ensaio os coeficientes de correção indicados pela ABNT NBR 7680-1:2015, sendo eles: “ $k_1$ ”, referente a relação  $h/d$  (altura/diâmetro) dos corpos-de-prova, quando  $h/d = 2$ , adota-se  $k_1 = 0,00$ ; “ $k_2$ ”, relacionado ao efeito do broqueamento (consequência da perfuração com broca) em função do diâmetro do testemunho, para um testemunho de 100 mm, como em questão,  $k_2 = 0,06$ , segundo a Tabela 3 da referida norma; “ $k_3$ ”, que faz menção a direção da extração em relação ao lançamento do concreto, como a extração realizada nesta pesquisa foi ortogonal ao lançamento  $k_3 = 0,05$ ; e “ $k_4$ ”, referente ao efeito da umidade do testemunho, quando rompido saturado  $k_4 = 0,00$ . Estes coeficientes são aplicados por meio da equação (16), apresentada abaixo, citada na ABNT NBR 7680:2015.

$$f_{ci,ext} = [1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)] * f_{ci,ext,inicial} \quad (16)$$

Onde  $f_{ci,ext}$  simboliza o resultado final da resistência à compressão axial do testemunho e  $f_{ci,ext,inicial}$ , o resultado obtido diretamente no ensaio de compressão axial. Em posse dos valores citados anteriormente para cada coeficiente de correção, tem-se um coeficiente final  $K$  equivalente a 1,11, a ser multiplicado pelo resultado do ensaio.

Este ensaio foi realizado para o fim de verificação da segurança estrutural, bem como de uma possível variação da resistência no Bloco 1-A1 devido ao desenvolvimento da patologia notada na galeria de drenagem do mesmo.

A própria ABNT NBR 7680-1:2015 sugere a realização de ensaios complementares ao de compressão, como o de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica, apresentado no subcapítulo a seguir, uma vez que pesquisas demonstram que o aumento de 1% no índice de vazios de um testemunho é capaz de conduzir a redução de 5 % a 7 % no valor de sua resistência à compressão.

#### 4.2.2.3 *Determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica (ABNT NBR 9778:2005)*

Seis testemunhos, sendo dois de cada linha de análise considerada, foram utilizados, antes do teste de resistência, para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica, seguindo as indicações da ABNT NBR 9778:2005, de modo a identificar correlações entre a profundidade de extração e seus respectivos resultados com o aumento de permeabilidade característico da patologia estudada. Todos os testemunhos passaram pelas mesmas condições de corte citadas no subcapítulo anterior.

Para a execução do ensaio, inicialmente as amostras passaram por processo de secagem, consistindo em um período de 72 h em estufa, com temperatura de  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Feito isto, suas massas foram determinadas (massa da amostra seca em estufa –  $m_s$ ). As amostras foram então imergidas em água à temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  por mais 72h.

Completada a etapa de saturação, os testemunhos foram dispostos em um recipiente cheio de água, em questão um equipamento de banho maria da marca SOLOTEST, da série 1200, progressivamente levado a ebulição, a qual teve que ser mantida por um período de 5 h, com volume de água aproximadamente constante. Este procedimento está demonstrado na Fotografia 34.

**Fotografia 34 - Testemunhos sendo submetidos à fervura para ensaio de absorção. A água se encontra rosada devido a solução de fenolftaleína borrifada nos corpos-de-prova durante a verificação da profundidade de carbonatação.**



**Fonte: a autora.**

Findada a ebulição, deixou-se esfriar a água naturalmente, por cerca de 3 h. A massa dos corpos-de-prova foi determinada tanto com o auxílio de balança hidrostática (massa da amostra saturada imersa em água após fervura –  $m_i$ ), quanto com balança de precisão comum, após secá-los com pano úmido (massa da amostra saturada em água após imersão e fervura –  $m_{sat}$ ).

A taxa de absorção (A) dos testemunhos pôde ser determinada pela equação (17), demonstrada abaixo.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (17)$$

O índice de vazios ( $I_v$ ), em porcentagem, por sua vez, foi calculado pela equação (18), a seguir.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (18)$$

Como foram analisados dois corpos-de-prova por faixa de extração, de modo a visualizar a dispersão de seus resultados de índice de vazios e taxa de absorção, fez-se a verificação da média, desvio padrão e coeficiente de variação destes.

A ABNT NBR 9778:2005, indica ainda a maneira adequada de calcular a massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ), a massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ ) e a massa específica real ( $\rho_r$ ) das amostras através das equações (19), (20) e (21), respectivamente, mostradas na sequência. Sendo seus resultados em gramas por centímetros cúbicos ( $\text{g/cm}^3$ ).

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (19)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (20)$$

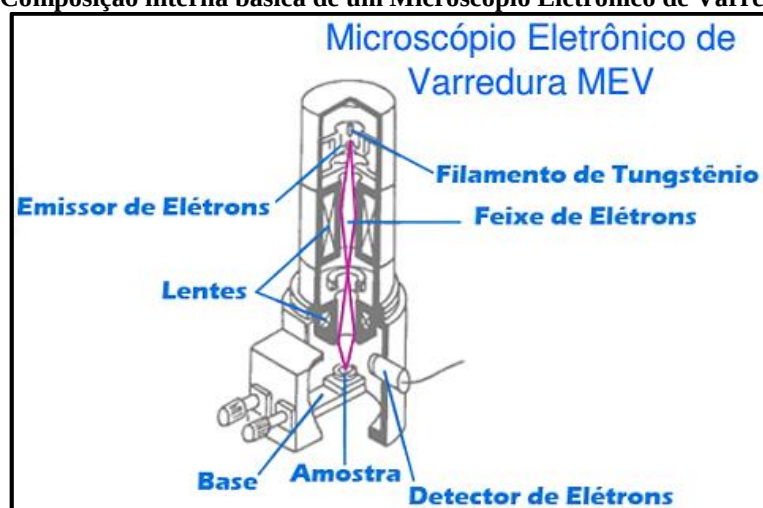
$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (21)$$

#### 4.2.2.4 Verificação da microestrutura do concreto com o auxílio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Sistema de Energia Dispersiva (EDS)

Para a verificação da microestrutura do concreto, em especial da pasta de cimento, visando identificar consequências do processo de lixiviação, fez-se uso da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), técnica que permite observar as amostras com uma elevada ampliação e nitidez, bem como do Sistema de Energia Dispersiva (EDS – *Energy Dispersive System*), também conhecido como Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX), elemento essencial para a caracterização de materiais a nível microscópico.

Conforme citado por Padilha e Ambrósio Filho, bem como por Kestenbach e Botta Filho (1985; 1989 apud HASPARYK, 2005), o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) possui um filamento de tungstênio, capaz de produzir um feixe de elétrons que incide na amostra, originando diferentes sinais, coletados independentemente, como os elétrons secundários (SE – *secondary electrons*), os elétrons retroespalhados (BSE – *backscattering electrons*) e os raios X, por exemplo. O microscópio é dito de “varredura” porque o feixe tem a propriedade de “varrer” a superfície da amostra, por meio de uma bobina de varredura aderida ao equipamento. A composição interna básica de um MEV está demonstrada na Figura 22.

**Figura 22 - Composição interna básica de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).**



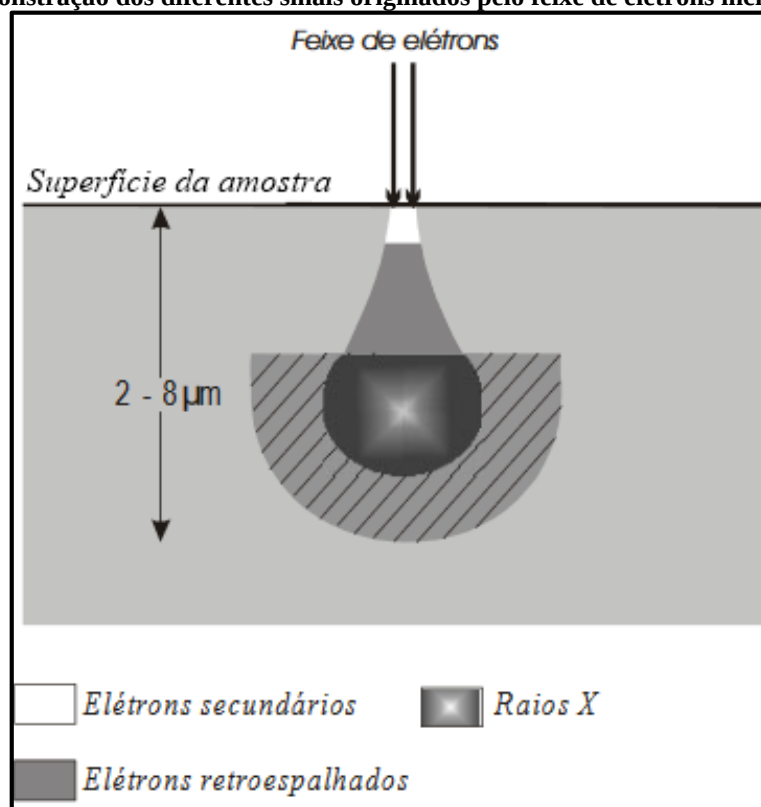
Fonte: Freitas Jr. (2013a).

A imagem fornecida pelo MEV representa, em diferentes tons de cinza, o mapeamento e a contagem tanto dos SE, quanto dos BSE emitidos pelo material em análise. A imagem de SE se restringe aos detalhes da superfície ionizada do material, tendo uma

resolução equivalente ao diâmetro do feixe de elétrons incidente. A imagem de BSE, por sua vez, se estende até alguns micrômetros no interior da amostra, demonstrando diferentes composições na região ionizada de acordo com o número atômico médio da zona de interação entre o material e o feixe de elétrons. A imagem de BSE tem resolução inferior à de SE (DUARTE *et al.*, 2003).

A Figura 23 expõe esquematicamente a diferença entre os sinais SE, BSE e raio X, em função da profundidade com que cada um deles consegue analisar um material, gerando imagens suas.

Figura 23 - Demonstração dos diferentes sinais originados pelo feixe de elétrons incidente na amostra.



Fonte: adaptado de Duarte *et al.* (2003).

O EDS, também utilizado neste trabalho, pode ser acoplado ao MEV, permitindo conhecer a composição qualitativa e semi-quantitativa das amostras, por meio da emissão de raios X característicos. Ele fornece perfis e mapas químicos que facilitam o estudo, uma vez que permitem identificar os elementos que compõe a imagem obtida com o MEV (DUARTE *et al.*, 2003).

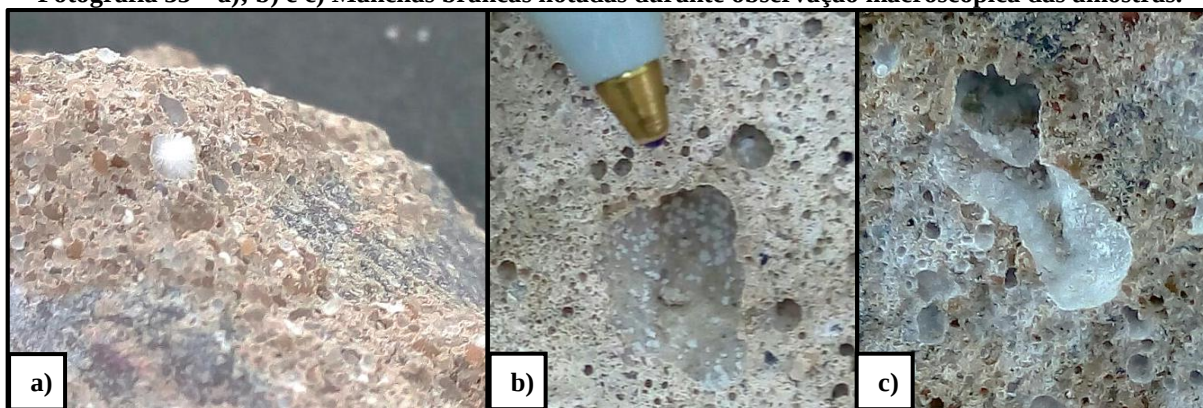
Observando estudos consagrados da microestrutura do concreto, como os realizados por Mehta e Monteiro (2008), costuma-se fazer uso de uma ampliação entre 200x e 5000x na amostra, permitindo analisá-la em uma escala entre 1 e 100  $\mu\text{m}$ , aproximadamente.

Quatro testemunhos foram submetidos ao MEV e, na maioria dos casos, também ao EDS. Dentre as faixas de extração, dois pertencem a linha “topo”, sendo eles identificados como amostra A-5 e A-7, e dois a linha “fundo”, A-3 e A-11, representando os dois extremos das faixas analisadas.

O preparo das amostras partiu da utilização dos testemunhos já rompidos para a extração de pequenos fragmentos, a serem avaliados microscopicamente. Fez-se isto com o auxílio de marreta e uma balança de precisão, de modo a pesar as quantidades enviadas para análise. Foram em média 150 g de cada amostra.

De modo a selecionar fragmentos que melhor representassem cada corpo-de-prova, fez-se inicialmente uma análise macroscópica destes, separando os grandes agregados, uma vez que o foco era a observação microscópica da pasta, e buscando possíveis incidências peculiares. Como exemplo destas incidências, a Fotografia 35 demonstra algumas manchas brancas notadas nos fragmentos extraídos, podendo estas representarem a formação de carbonato de cálcio nos poros do concreto.

**Fotografia 35 – a); b) e c) Manchas brancas notadas durante observação macroscópica das amostras.**



**Fonte: a autora.**

As amostras foram analisadas no Laboratório da Eletrobras Furnas, em Goiânia (GO), em um MEV da marca Tescan, modelo VEGA 3 XMU, tendo a ele acoplados dois

detectores para análise por EDS da marca Oxford, modelo X-MaxN. Para este trabalho, foram captadas imagens de SE. O MEV utilizado está ilustrado na Fotografia 36.

**Fotografia 36 - MEV utilizado para a análise das amostras.**



**Fonte: a autora.**

Com o intuito de tornar as amostras de concreto condutoras de corrente elétrica, de modo a facilitar sua análise por MEV e pelo EDS, elas foram submetidas a um processo de metalização, aplicando-se sobre elas uma camada de 5 nanômetros de ouro, em um equipamento de recobrimento por pulverização catódica da marca Quorum, modelo Q 150R ES, mostrado na Fotografia 37.

**Fotografia 37 - Equipamento utilizado para a metalização das amostras, durante a preparação das mesmas para o ensaio com MEV e EDS.**

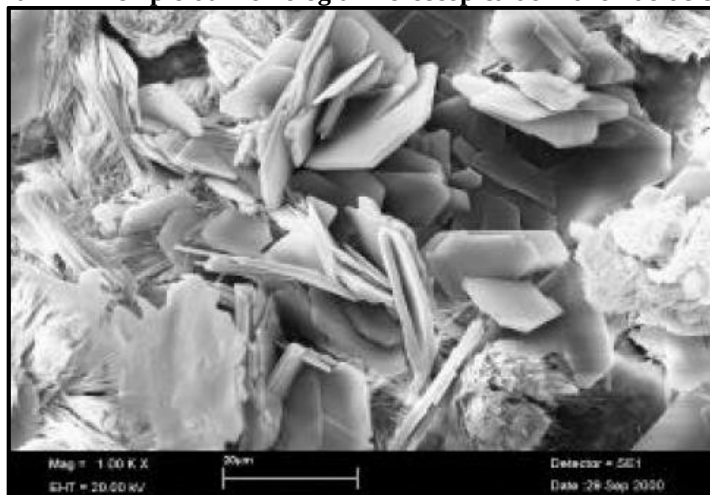


**Fonte: a autora.**

Apenas para conhecimento, o procedimento de metalização consiste na precipitação de uma película de material condutor (normalmente ouro ou carbono) sobre a superfície da amostra, colocada previamente em condição de vácuo, tornando-a capaz de conduzir corrente elétrica (DUARTE *et al.*, 2003).

Foram observadas principalmente características como a porosidade da pasta e a presença / ausência de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) na mesma, sendo este o componente dela mais afetado pela patologia estudada. O hidróxido de cálcio se apresenta microestruturalmente na forma de cristais com uma morfologia prismática hexagonal distinta, como ilustrado na Figura 24.

**Figura 24 - Exemplo da morfologia microscópica do hidróxido de cálcio.**



**Fonte: Jorge *et al.* (2001).**

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos com base no emprego dos materiais e métodos listados no capítulo anterior estão apresentados nos subcapítulos seguintes, bem como as discussões a respeito destes.

### 5.1 MENSURAÇÃO DA PERDA DE MASSA

Inicialmente, foram analisados os resultados dos ensaios físico-químicos da água coletada no interior da galeria e no reservatório, de modo a avaliar, para cada substância, a diferença entre ambos. Significativas alterações entre os valores apresentados para a água dos drenos e a de comparação (lago) representam retenção ou extração de material do concreto.

Na Tabela 5 estão listados os principais parâmetros e substâncias verificadas nas análises de água, apresentando para cada mês a diferença entre a média dos resultados dos drenos (coletas realizadas no interior da galeria de drenagem) e o resultado da água de comparação. Valores negativos representam que houve retenção pelo maciço de concreto, como que por uma filtragem, enquanto que valores positivos demonstram acréscimo de substâncias na água, logo, carreamento de material do concreto. Foram suprimidos da tabela os meses em que não se pôde realizar coleta.

**Tabela 5 - Diferença entre as concentrações de substâncias e parâmetros das águas da galeria (média dos drenos) e do lago, obtida por meio da utilização dos resultados das análises físico-químicas da água para cada mês.**

| Mês    | pH   | Cond.<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Fe Total<br>(mg/L) | Ca+2<br>(mg/L) | Mg+2<br>(mg/L) | NH4+<br>( $\mu\text{g}/\text{L}$ ) | Turbidez<br>(NTU) | Cor<br>(Pt-Co) | Alcal.<br>(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: a autora.

Observando a tabela, nota-se um acréscimo de pH na água, justificado pela hidrólise dos componentes da pasta, processo que reduz o pH do concreto, pelo carreamento de hidróxidos e, conseqüentemente, eleva o da água, tornando-a mais alcalina. Também devido a isto, se justifica o aumento da alcalinidade na água que sai dos drenos em relação a do

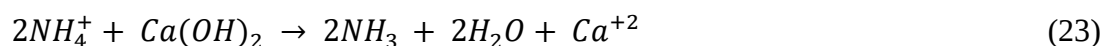
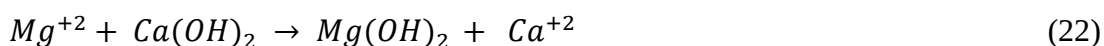
reservatório. O aumento do pH é, portanto, proporcional ao aumento da alcalinidade da água analisada.

A condutividade é outro parâmetro ampliado exponencialmente da água do lago para a que deságua no interior da galeria. Sendo a condutividade elétrica da água um indicativo da concentração de íons ou sais dissolvidos presentes na água, seu aumento reforça o fato de que está ocorrendo a extração de substâncias do concreto.

A concentração de ferro total apresentou uma variação negativa, indicando a retenção de materiais ferrosos e embasando o fato de que o concreto estudado não é armado, pois, caso fosse, pelo tempo que se desenvolve a patologia, inevitavelmente já teria atingido a armadura e iniciado o processo de corrosão da mesma.

O íon Cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), como esperado, foi o íon com maior teor acrescido após a passagem pelo concreto, reafirmando a ideia defendida na literatura de que os produtos de cálcio são os mais facilmente solubilizados pela água que atravessa um maciço de concreto.

O íon Magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) e a amônia ( $\text{NH}_4^+$ ), como pôde-se notar na tabela, foram em alguns momentos retidos pelo concreto e, em outros, carregados. Ambos são elementos com comportamentos singulares e semelhantes perante a pasta de cimento, podendo ser explicados pelo mesmo princípio. Sais de magnésio e sais de amônia, como citado por Sales *et al.* (2014), são capazes de reagir com o concreto, solubilizando o hidróxido de cálcio presente na pasta. As reações que descrevem o processo com o magnésio e a amônia estão demonstradas pelas equações 22 e 23, respectivamente.



Como é possível observar pela equação (22), o íon magnésio se associa ao hidróxido de cálcio, formando hidróxido de magnésio, um produto muito menos solúvel que o C-H, como citado por Begonha (2001), e liberando íon cálcio no meio. Logo, quando se observa na Tabela 5 valores negativos para a concentração de magnésio, é provavelmente apenas um indicativo de que este íon, no trajeto pelo interior do concreto, se transformou em um produto

mais estável, não estando livre no meio aquoso. Por outro lado, quando apresenta valores positivos, pode simplesmente não ter reagido com a pasta e, além disso, ter solubilizado uma pequena fração do magnésio presente na mesma, devido a impurezas do cimento.

A dolomita, uma impureza presente em grande parte dos compostos calcários, costuma ser uma fonte de óxido de magnésio (MgO) no cimento. Uma parte deste óxido, presente no clínquer, entra em solução com os demais componentes do cimento, outra, no entanto, permanece como MgO cristalino (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Com a equação (23), o processo é semelhante, tendo, no entanto, uma diferença notável. Como observado, a amônia também se associa ao hidróxido de cálcio, formando água, liberando cálcio e, diferente da reação com o magnésio, concebendo um gás, o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Este naturalmente se desprende do concreto, encaminhando-se pelos poros para o exterior. Assim, quando a amônia apresenta valores negativos na Tabela 5, na verdade demonstra não necessariamente uma retenção, mas sim que reagiu com a pasta de cimento. Por outro lado, quando apresenta, em raras vezes, valores positivos, evidencia que não reagiu e ainda, provavelmente, carregou algum pequeno teor de amônia retido pelo concreto, que também não chegou a se associar ao C-H.

Tendo conhecimento do processo de ataque pelo sal de amônia, é interessante salientar que em janeiro, quando o íon cálcio teve sua maior concentração lixiviada entre os meses analisados, demonstrou também a amônia sua maior concentração retida. Portanto, pode-se prever uma grande possibilidade das reações da amônia com a pasta de cimento (o que consumiu a amônia da água do reservatório) terem favorecido este aumento de teor do íon cálcio na água coletada nos drenos.

Quanto a cor e a turbidez, muitas vezes relacionadas, indicam, respectivamente, a presença de substâncias dissolvidas na água (como metais e matéria orgânica, por exemplo) e o espalhamento de luz na mesma em função da quantidade de partículas em suspensão ou em estado coloidal (com partículas muito finas, não vistas a olho nu). Como é possível inferir, ao passar por um meio filtrante, neste caso o concreto, a água do reservatório, de tom esverdeado, sai nos drenos praticamente incolor, logo, com um teor muito menor de impurezas, tanto suspensas quanto dissolvidas, provocando uma redução dos parâmetros cor e turbidez.

Como observado pela pesquisa de Jorge *et al.* (2001), baseada na indução em laboratório da ocorrência da lixiviação, no início do desenvolvimento desta patologia (primeiros 11 dias), amostras de água percolada apresentam altos teores de sódio e potássio, substâncias presentes na solução dos poros do concreto, sem remover produtos sólidos da pasta. No entanto, passado este período aumenta-se gradualmente a concentração de cálcio e, posteriormente e em menor grau, sílica nas amostras, evidenciando a dissolução do hidróxido de cálcio (CH) e, então, de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

O estudo de Ekström (2001), também realizado em laboratório, e de Santi (2008), desenvolvido em campo, na UHE Derivação do Rio Jordão, demonstraram resultados semelhantes, com as concentrações de cálcio superando as de quaisquer outros componentes.

Uma vez que o concreto estudado já está a mais de trinta anos em contato com a água do reservatório e submetido a percolação de água, já se esperava que o produto mais evidente das amostras de água fosse o cálcio. Por isso, a perda de massa do concreto foi mensurada neste trabalho em função apenas da extração de íons cálcio.

Como anteriormente citado, no que tange as análises de água, alguns meses tiveram que ser saltados, assim como não foram realizadas coletas em dois drenos, gerando uma malha de dados faltantes para a pesquisa, como pode ser observado na Tabela 6, onde cada “x” disposto representa uma ausência nos resultados da concentração de cálcio.

**Tabela 6 - Resultados obtidos nas análises de água para a concentração de  $Ca^{+2}$  (mg/L), ressaltando os dados faltantes (“x”).**

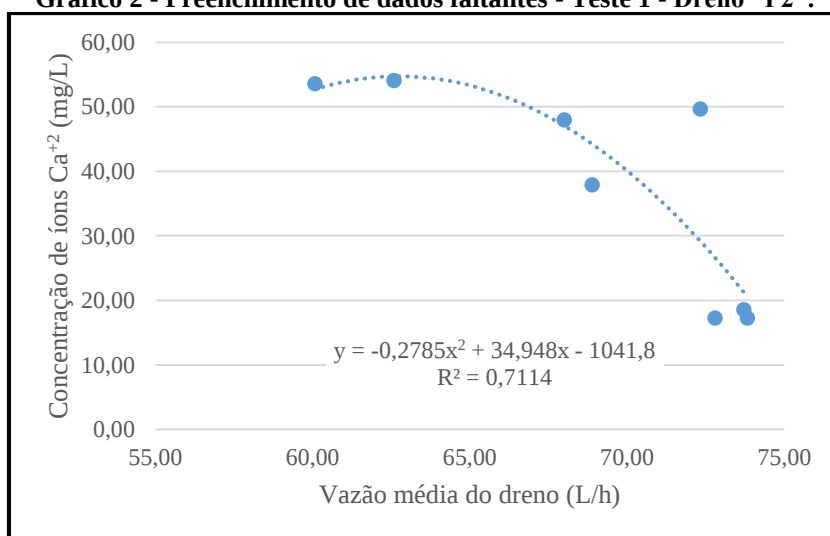
| Mês       | Data da coleta | Ponto de Coleta da Amostra |       |       |       |    |       | Lago |
|-----------|----------------|----------------------------|-------|-------|-------|----|-------|------|
|           |                | P1                         | P2    | P3    | P4    | P5 | P1-b  |      |
| Junho     | 03/06/2015     | x                          | 17,28 | 15,84 | 17,60 | x  | x     | 4,03 |
| Julho     | 08/07/2015     | x                          | 18,56 | 18,24 | 18,56 | x  | x     | 4,75 |
| Agosto    | 14/08/2015     | x                          | 49,68 | 52,56 | 50,80 | x  | x     | 3,97 |
| Setembro  | 18/09/2015     | x                          | 48,00 | 46,00 | 34,40 | x  | x     | 4,99 |
| Outubro   | 02/10/2015     | x                          | 54,08 | 57,20 | 56,20 | x  | 51,52 | x    |
| Novembro  | -              | x                          | x     | x     | x     | x  | x     | x    |
| Dezembro  | -              | x                          | x     | x     | x     | x  | x     | x    |
| Janeiro   | 22/01/2016     | x                          | 53,60 | 54,88 | 49,44 | x  | 51,20 | 2,99 |
| Fevereiro | -              | x                          | x     | x     | x     | x  | x     | x    |
| Março     | 03/03/2016     | x                          | 37,92 | 55,20 | 53,92 | x  | 43,36 | 5,31 |
| Abril     | -              | x                          | x     | x     | x     | x  | x     | x    |
| Maio      | 31/05/2016     | x                          | 49,28 | 56,64 | 49,76 | x  | 46,88 | 4,03 |

**Fonte:** a autora.

No preenchimento dos dados dos meses faltantes, para aqueles drenos onde estava sendo feita coleta regular, utilizou-se de regressão polinomial, partindo de dois testes distintos, um com a verificação da correlação entre as variáveis cota do reservatório e concentração de íon cálcio em um determinado dreno ou no lago (Teste 1) e outro com a correlação entre a vazão de um dreno e sua respectiva concentração de íon cálcio (Teste 2).

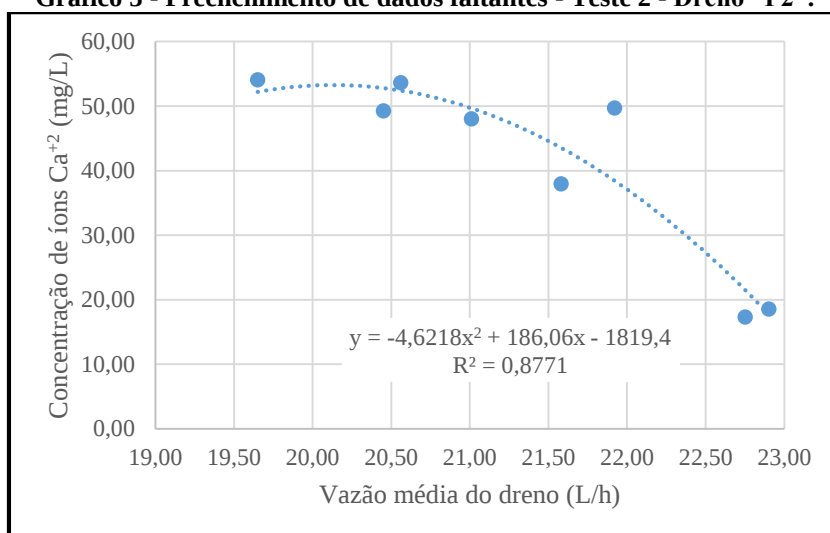
Como exemplo da correlação obtida para cada teste, os Gráficos 2 e 3 demonstram o comportamento do Dreno 2 (P2) para ambos, respectivamente Testes 1 e 2.

**Gráfico 2 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 1 - Dreno “P2”.**



**Fonte: a autora.**

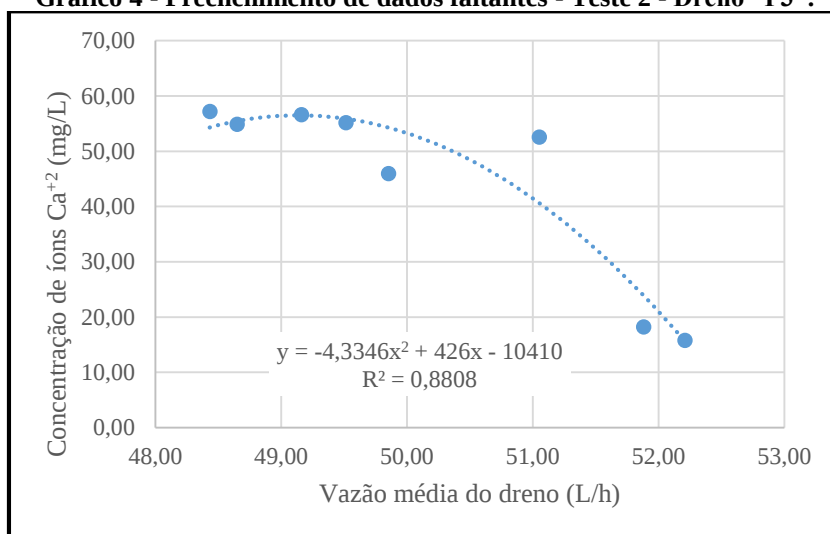
**Gráfico 3 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 2 - Dreno “P2”.**



**Fonte: a autora.**

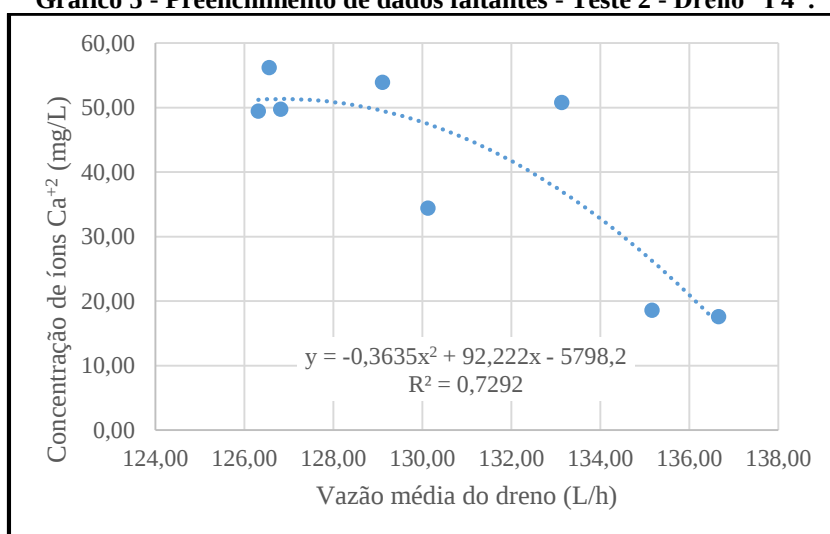
Como observado, o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para o Teste 2 foi superior ao obtido para o Teste 1, considerando um polinômio de 2º grau nos dois casos. Logo, relacionar a vazão por dreno com sua respectiva concentração de íon cálcio é uma medida mais efetiva para o preenchimento dos dados faltantes. O mesmo procedimento foi realizado para os drenos 3 e 4. Em todos eles o Teste 2 apresentou um coeficiente de determinação mais satisfatório. Os Gráficos 4 e 5 demonstram, portanto, apenas os resultados para este segundo teste dos drenos 3 e 4.

**Gráfico 4 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 2 - Dreno “P3”.**



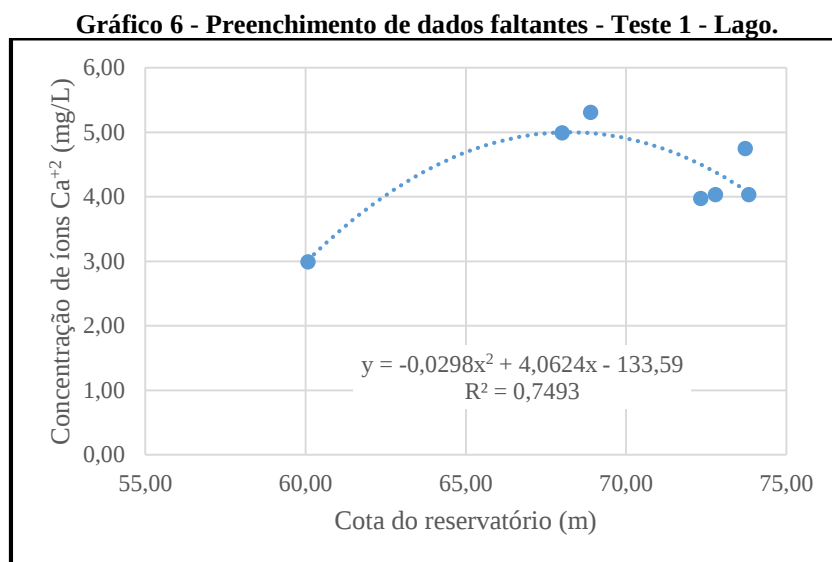
Fonte: a autora.

**Gráfico 5 - Preenchimento de dados faltantes - Teste 2 - Dreno “P4”.**



Fonte: a autora.

Visando encontrar as concentrações de íons cálcio ausentes para a água do lago, foi realizado apenas o Teste 1, correlacionando estas com a cota do reservatório no período de cada coleta. O resultado está apresentado no Gráfico 6.



Fonte: a autora.

Em posse das equações demonstradas nos Gráficos 3, 4, 5 e 6, fez-se possível preencher as lacunas das colunas “P2”, “P3”, “P4” e “Lago” da Tabela 6, respectivamente, utilizando como dado de entrada em cada equação (“x”) a vazão média do referido dreno no mês considerado ou, no caso do lago, a cota média do reservatório no mesmo.

No caso dos drenos 1 e 5, como não houve análise da água que deságua através deles em nenhum dos meses, suas vazões foram consideradas como iguais as médias mensais das concentrações de íons cálcio dos demais drenos de paramento (P2, P3 e P4). Além das médias, foram também verificadas a variância (Var.), o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) entre os resultados destes drenos, como pode ser notado na Tabela 7.

**Tabela 7 - Média das concentrações de P2, P3 e P4 para preenchimento de dados faltantes em P1 e P5.**

| Mês      | Conc. de $\text{Ca}^{+2}$ - P2 (mg/L) | Conc. de $\text{Ca}^{+2}$ - P3 (mg/L) | Conc. de $\text{Ca}^{+2}$ - P4 (mg/L) | Média (mg/L) | Var. (mg/L) <sup>2</sup> | DP (mg/L) | CV (%) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------------------|-----------|--------|
| Junho    | 17,28                                 | 15,84                                 | 17,60                                 | 16,91        | 0,88                     | 0,94      | 5,55   |
| Julho    | 18,56                                 | 18,24                                 | 18,56                                 | 18,45        | 0,03                     | 0,18      | 1,00   |
| Agosto   | 49,68                                 | 52,56                                 | 50,80                                 | 51,01        | 2,11                     | 1,45      | 2,85   |
| Setembro | 48,00                                 | 46,00                                 | 34,40                                 | 42,80        | 53,92                    | 7,34      | 17,16  |
| Outubro  | 54,08                                 | 57,20                                 | 56,20                                 | 55,83        | 2,54                     | 1,59      | 2,85   |
| Novembro | 50,90                                 | 52,96                                 | 49,94                                 | 51,27        | 2,39                     | 1,54      | 3,01   |
| Dezembro | 33,38                                 | 20,27                                 | 38,76                                 | 30,80        | 90,47                    | 9,51      | 30,88  |

| Mês       | Conc. de<br>Ca+2 - P2 | Conc. de<br>Ca+2 - P3 | Conc. de<br>Ca+2 - P4 | Média<br>(mg/L) | Var.<br>(mg/L) <sup>2</sup> | DP<br>(mg/L) | CV (%) |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------|--------|
| Janeiro   | 53,60                 | 54,88                 | 49,44                 | 52,64           | 8,09                        | 2,84         | 5,40   |
| Fevereiro | 50,55                 | 56,19                 | 50,68                 | 52,47           | 10,36                       | 3,22         | 6,14   |
| Março     | 37,92                 | 55,20                 | 53,92                 | 49,01           | 92,71                       | 9,63         | 19,64  |
| Abril     | 51,25                 | 56,60                 | 50,44                 | 52,76           | 11,20                       | 3,35         | 6,34   |
| Maio      | 49,28                 | 56,64                 | 49,76                 | 51,89           | 16,96                       | 4,12         | 7,93   |

Fonte: a autora.

No dreno 1-b, ainda que em quatro meses tenha sido realizada análise de água, não foi suficiente para montar uma equação que satisfizesse suas concentrações de íons cálcio ao longo dos doze meses da pesquisa. Logo, foram mantidos esses quatro resultados e os demais foram preenchidos da mesma maneira que os dados dos drenos 1 e 5.

Como notado por meio da Tabela 7, os meses de setembro de 2015 e março de 2016 apresentaram coeficientes de variação médios (indicados em amarelo claro) e o mês de dezembro de 2015 uma dispersão muito elevada (destacada em vermelho). Isto ocorreu devido ao baixo teor de cálcio na amostra extraída do dreno 3 em dezembro, em relação ao observado nos outros drenos. Os demais meses apresentaram uma baixa dispersão (marcada em verde), considerando os intervalos defendidos por Gomes (2000), como citado no subcapítulo 1.1.3.

Para os meses de setembro de 2015 e março de 2016 optou-se por manter a média obtida, uma vez que a dispersão não foi tão elevada. No mês de dezembro de 2015, por sua vez, visando reduzir a variabilidade no resultado a ser imputado nas colunas de “P1”, “P5” e “P1-b”, foi extraído da média a concentração no dreno 3 no referido mês.

Feito isto, a média do mês de dezembro foi para 36,07 mg/L, a variância para 14,47 (mg/L)<sup>2</sup>, o desvio padrão para 3,80 mg/L e, finalmente, o coeficiente de variação para 10,55%, caracterizando uma dispersão média, julgada aceitável neste caso.

Partindo-se das ações referidas, foi possível preencher os dados faltantes da Tabela 6, dando origem a Tabela 8, disposta na página seguinte.

**Tabela 8 - Concentrações de íons cálcio (mg/L), estando em destaque os valores obtidos a partir dos métodos adotados para o preenchimento de dados faltantes.**

| Mês       | Data da coleta | Ponto de Coleta da Amostra |       |       |       |       |       |      |
|-----------|----------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|           |                | P1                         | P2    | P3    | P4    | P5    | P1-b  | Lago |
| Junho     | 03/06/2015     | 16,91                      | 17,28 | 15,84 | 17,60 | 16,91 | 16,91 | 4,03 |
| Julho     | 08/07/2015     | 18,45                      | 18,56 | 18,24 | 18,56 | 18,45 | 18,45 | 4,75 |
| Agosto    | 14/08/2015     | 51,01                      | 49,68 | 52,56 | 50,80 | 51,01 | 51,01 | 3,97 |
| Setembro  | 18/09/2015     | 42,80                      | 48,00 | 46,00 | 34,40 | 42,80 | 42,80 | 4,99 |
| Outubro   | 02/10/2015     | 55,83                      | 54,08 | 57,20 | 56,20 | 55,83 | 51,52 | 3,93 |
| Novembro  | -              | 51,27                      | 50,90 | 52,96 | 49,94 | 51,27 | 51,27 | 2,74 |
| Dezembro  | -              | 36,07                      | 33,38 | 20,27 | 38,76 | 36,07 | 36,07 | 2,04 |
| Janeiro   | 22/01/2016     | 52,64                      | 53,60 | 54,88 | 49,44 | 52,64 | 51,20 | 2,99 |
| Fevereiro | -              | 52,47                      | 50,55 | 56,19 | 50,68 | 52,47 | 52,47 | 4,75 |
| Março     | 03/03/2016     | 49,01                      | 37,92 | 55,20 | 53,92 | 49,01 | 43,36 | 5,31 |
| Abril     | -              | 52,76                      | 51,25 | 56,60 | 50,44 | 52,76 | 52,76 | 4,39 |
| Maio      | 31/05/2016     | 51,89                      | 49,28 | 56,64 | 49,76 | 51,89 | 46,88 | 4,03 |

**Fonte:** a autora.

Para a obtenção das concentrações de íons cálcio lixiviadas em cada mês e de cada dreno, bastou realizar a subtração entre a concentração do dreno desejado e a do lago naquele período, como explicado no subcapítulo 3.1.1. A Tabela 9 apresenta essas quantidades.

**Tabela 9 - Quantidade mensal de íon  $\text{Ca}^{+2}$  lixiviada, em mg/L, por dreno analisado.**

| Mês       | Quantidade de íon $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (mg/L) |       |       |       |       |       |
|-----------|-----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | P1                                                  | P2    | P3    | P4    | P5    | P1-b  |
| Junho     | 12,88                                               | 13,25 | 11,81 | 13,57 | 12,88 | 12,88 |
| Julho     | 13,71                                               | 13,81 | 13,49 | 13,81 | 13,71 | 13,71 |
| Agosto    | 47,04                                               | 45,71 | 48,59 | 46,83 | 47,04 | 47,04 |
| Setembro  | 37,81                                               | 43,01 | 41,01 | 29,41 | 37,81 | 37,81 |
| Outubro   | 51,89                                               | 50,15 | 53,27 | 52,27 | 51,89 | 47,59 |
| Novembro  | 48,53                                               | 48,17 | 50,23 | 47,21 | 48,53 | 48,53 |
| Dezembro  | 34,03                                               | 31,34 | 18,23 | 36,72 | 34,03 | 34,03 |
| Janeiro   | 49,65                                               | 50,61 | 51,89 | 46,45 | 49,65 | 48,21 |
| Fevereiro | 47,73                                               | 45,80 | 51,44 | 45,94 | 47,73 | 47,73 |
| Março     | 43,71                                               | 32,61 | 49,89 | 48,61 | 43,71 | 38,05 |
| Abril     | 48,37                                               | 46,87 | 52,21 | 46,05 | 48,37 | 48,37 |
| Maio      | 47,86                                               | 45,25 | 52,61 | 45,73 | 47,86 | 42,85 |

**Fonte:** a autora.

As vazões medidas ao longo destes doze meses de estudo para cada um dos seis drenos analisados foram resumidas a uma média mensal, de modo a facilitar sua associação a quantidade lixiviada por mês, demonstrada na Tabela 9.

Além da média mensal da vazão de cada dreno, foi verificada a dispersão entre os dados coletados no decorrer de cada mês, como é possível observar nas Tabelas 10, 11, 12, 13, 14 e 15, representando os drenos 1, 2, 3, 4, 5 e 1-b, respectivamente. Nelas, coeficientes

de variação indicados em verde apresentam baixa dispersão; em amarelo claro, média; em amarelo escuro, alta; e em vermelho, muito alta.

**Tabela 10 - Dreno 1 - Análise da vazão do dreno em cada mês.**

| Mês    | Vazão média (l/h) | Variância da vazão (m²) | D.P. da Vazão (m) | C.V. da Vazão (%) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| jun/15 | 0,19              | 0,00                    | 0,03              | 14,75             |
| jul/15 | 0,18              | 0,00                    | 0,01              | 6,76              |
| ago/15 | 0,19              | 0,00                    | 0,02              | 8,01              |
| set/15 | 0,18              | 0,00                    | 0,01              | 6,24              |
| out/15 | 0,18              | 0,00                    | 0,01              | 6,27              |
| nov/15 | 0,17              | 0,00                    | 0,01              | 8,12              |
| dez/15 | 0,18              | 0,00                    | 0,01              | 5,79              |
| jan/16 | 0,26              | 0,02                    | 0,13              | 49,20             |
| fev/16 | 0,20              | 0,00                    | 0,01              | 7,49              |
| mar/16 | 0,23              | 0,00                    | 0,05              | 22,88             |
| abr/16 | 0,19              | 0,00                    | 0,02              | 11,81             |
| mai/16 | 0,18              | 0,00                    | 0,01              | 3,97              |

Fonte: a autora.

**Tabela 11 - Dreno 2 - Análise da vazão do dreno em cada mês.**

| Mês    | Vazão média (l/h) | Variância da vazão (m²) | D.P. da Vazão (m) | C.V. da Vazão (%) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| jun/15 | 22,75             | 1,00                    | 1,00              | 4,40              |
| jul/15 | 22,90             | 0,08                    | 0,29              | 1,26              |
| ago/15 | 21,92             | 0,12                    | 0,34              | 1,55              |
| set/15 | 21,01             | 0,23                    | 0,48              | 2,29              |
| out/15 | 19,65             | 0,09                    | 0,30              | 1,53              |
| nov/15 | 19,43             | 0,19                    | 0,43              | 2,23              |
| dez/15 | 18,06             | 0,05                    | 0,22              | 1,20              |
| jan/16 | 20,56             | 1,87                    | 1,37              | 6,65              |
| fev/16 | 20,88             | 0,11                    | 0,34              | 1,62              |
| mar/16 | 21,58             | 0,06                    | 0,25              | 1,18              |
| abr/16 | 20,77             | 0,15                    | 0,39              | 1,87              |
| mai/16 | 20,45             | 0,54                    | 0,73              | 3,58              |

Fonte: a autora.

**Tabela 12 - Dreno 3 - Análise da vazão do dreno em cada mês.**

| Mês    | Vazão média (l/h) | Variância da vazão (m²) | D.P. da Vazão (m) | C.V. da Vazão (%) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| jun/15 | 52,21             | 2,14                    | 1,46              | 2,80              |
| jul/15 | 51,88             | 0,34                    | 0,58              | 1,13              |
| ago/15 | 51,05             | 0,09                    | 0,30              | 0,58              |
| set/15 | 49,85             | 0,28                    | 0,52              | 1,05              |
| out/15 | 48,43             | 0,10                    | 0,31              | 0,65              |
| nov/15 | 48,21             | 0,31                    | 0,56              | 1,16              |
| dez/15 | 46,24             | 0,41                    | 0,64              | 1,38              |
| jan/16 | 48,65             | 0,84                    | 0,92              | 1,88              |
| fev/16 | 48,79             | 0,07                    | 0,27              | 0,55              |
| mar/16 | 49,51             | 0,07                    | 0,27              | 0,54              |
| abr/16 | 49,30             | 0,07                    | 0,26              | 0,53              |
| mai/16 | 49,16             | 0,07                    | 0,26              | 0,52              |

Fonte: a autora.

Tabela 13 - Dreno 4 - Análise da vazão do dreno em cada mês.

| Mês    | Vazão média (l/h) | Variância da vazão (m²) | D.P. da Vazão (m) | C.V. da Vazão (%) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| jun/15 | 136,65            | 16,73                   | 4,09              | 2,99              |
| jul/15 | 135,16            | 0,85                    | 0,92              | 0,68              |
| ago/15 | 133,13            | 1,20                    | 1,10              | 0,82              |
| set/15 | 130,12            | 1,41                    | 1,19              | 0,91              |
| out/15 | 126,56            | 1,99                    | 1,41              | 1,11              |
| nov/15 | 125,06            | 1,93                    | 1,39              | 1,11              |
| dez/15 | 121,02            | 3,75                    | 1,94              | 1,60              |
| jan/16 | 126,31            | 5,34                    | 2,31              | 1,83              |
| fev/16 | 127,93            | 1,55                    | 1,25              | 0,97              |
| mar/16 | 129,10            | 0,79                    | 0,89              | 0,69              |
| abr/16 | 128,21            | 0,59                    | 0,77              | 0,60              |
| mai/16 | 126,81            | 2,48                    | 1,57              | 1,24              |

Fonte: a autora.

Tabela 14 - Dreno 5 - Análise da vazão do dreno em cada mês.

| Mês    | Vazão média (l/h) | Variância da vazão (m²) | D.P. da Vazão (m) | C.V. da Vazão (%) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| jun/15 | 2,13              | 0,02                    | 0,13              | 6,15              |
| jul/15 | 2,08              | 0,00                    | 0,03              | 1,40              |
| ago/15 | 2,02              | 0,00                    | 0,02              | 1,18              |
| set/15 | 1,95              | 0,00                    | 0,06              | 2,87              |
| out/15 | 1,80              | 0,00                    | 0,04              | 2,23              |
| nov/15 | 1,78              | 0,00                    | 0,06              | 3,45              |
| dez/15 | 1,64              | 0,00                    | 0,04              | 2,38              |
| jan/16 | 1,80              | 0,01                    | 0,09              | 4,77              |
| fev/16 | 1,83              | 0,00                    | 0,02              | 1,05              |
| mar/16 | 1,86              | 0,00                    | 0,02              | 1,14              |
| abr/16 | 1,81              | 0,00                    | 0,03              | 1,70              |
| mai/16 | 1,75              | 0,00                    | 0,05              | 2,76              |

Fonte: a autora.

Tabela 15 - Dreno 1-b - Análise da vazão do dreno em cada mês.

| Mês    | Vazão média (l/h) | Variância da vazão (m²) | D.P. da Vazão (m) | C.V. da Vazão (%) |
|--------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| jun/15 | 12,49             | 0,15                    | 0,38              | 3,06              |
| jul/15 | 12,39             | 0,13                    | 0,37              | 2,96              |
| ago/15 | 11,66             | 0,11                    | 0,33              | 2,84              |
| set/15 | 10,80             | 0,22                    | 0,47              | 4,39              |
| out/15 | 9,72              | 0,06                    | 0,24              | 2,42              |
| nov/15 | 9,54              | 0,12                    | 0,35              | 3,64              |
| dez/15 | 8,73              | 0,02                    | 0,15              | 1,69              |
| jan/16 | 10,20             | 0,44                    | 0,67              | 6,53              |
| fev/16 | 10,23             | 0,10                    | 0,31              | 3,04              |
| mar/16 | 10,62             | 0,06                    | 0,25              | 2,32              |
| abr/16 | 10,30             | 0,07                    | 0,26              | 2,57              |
| mai/16 | 9,76              | 0,07                    | 0,26              | 2,63              |

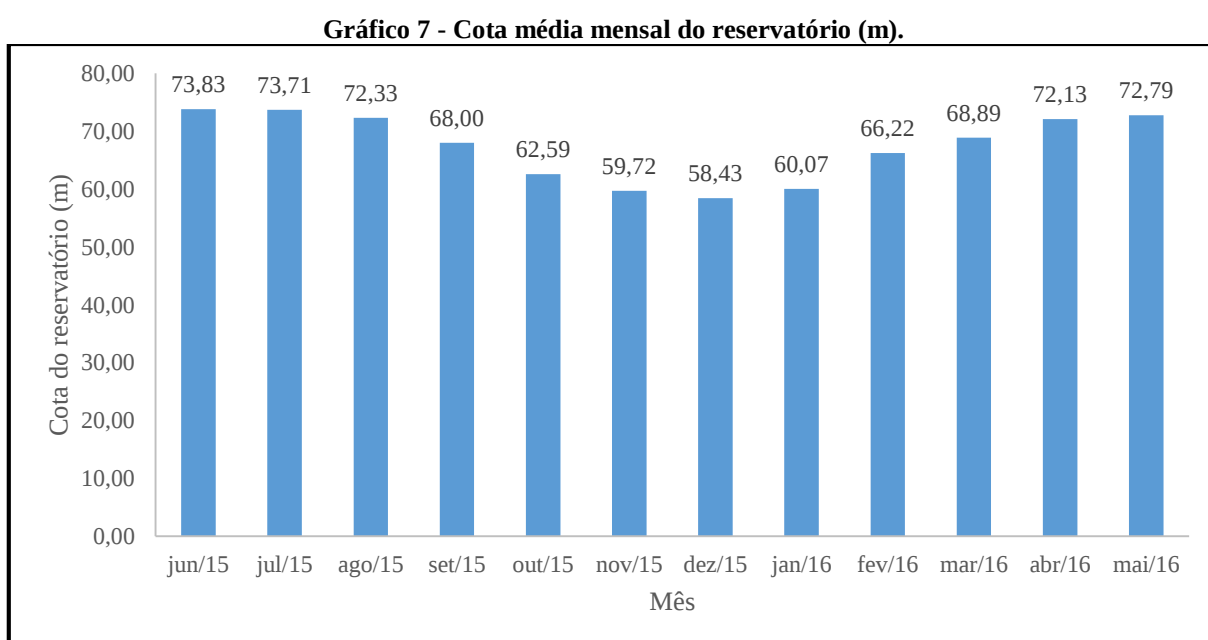
Fonte: a autora.

Como foi possível notar pelas tabelas apresentadas anteriormente, as vazões medidas para os drenos tiveram uma variação regular, com baixa dispersão, sendo o dreno 1 uma exceção a esta afirmativa. No entanto, este dreno apresenta uma condição peculiar, notada ao longo dos meses de estudo.

O Dreno 1 está localizado próximo a junta de dilatação entre os Blocos 1-A e 1-A1 e, através desta junta, em três ocasiões distintas de medição, notou-se uma infiltração. Nos resultados das medições realizadas nesses momentos o Dreno 1 apresentou valores próximos ao dobro dos que comumente apresenta. Duas delas foram em janeiro e uma em março, todas um dia após uma forte precipitação. Inferiu-se, então, que este dreno sofre influência das infiltrações da junta de dilatação, quando ocorrem.

A partir da extração destes três valores diferenciados, o coeficiente de variação no mês de janeiro caiu para 9,91% e no mês de março para 5,29%. Demonstrando, assim, que o Dreno 1 também apresenta baixa dispersão de resultados, excetuando-se os dias de fortes chuvas, quando é influenciado por infiltrações na junta de dilatação próxima a ele.

Apenas em caráter ilustrativo, foi elaborado o Gráfico 7, demonstrando a variação da cota do reservatório ao longo dos doze meses da pesquisa, por meio da exposição da cota média mensal do mesmo neste período.



**Fonte: a autora.**

Tendo conhecimento das concentrações de íons cálcio e das médias das vazões para cada dreno por mês, fez-se possível mensurar a perda de massa, em função de  $\text{Ca}^{+2}$ , no período de estudo para cada dreno e, então, o total lixiviado através dos drenos analisados. As Tabelas 16, 17, 18, 19, 20 e 21 explicitam os resultados do cálculo da perda de massa para cada dreno. Sendo, respectivamente, resultados dos Drenos 1, 2, 3, 4, 5 e 1-b.

**Tabela 16 - Perda de massa de  $\text{Ca}^{+2}$  através do Dreno 1.**

| Mês          | Vazão média (L/h) | Teor de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviado (mg/L) | Massa de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (mg/h) | Massa de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (kg/mês) |
|--------------|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| jun/15       | 0,19              | 12,88                                     | 2,43                                       | 0,0017                                       |
| jul/15       | 0,18              | 13,71                                     | 2,45                                       | 0,0018                                       |
| ago/15       | 0,19              | 47,04                                     | 8,96                                       | 0,0067                                       |
| set/15       | 0,18              | 37,81                                     | 6,98                                       | 0,0050                                       |
| out/15       | 0,18              | 51,89                                     | 9,31                                       | 0,0069                                       |
| nov/15       | 0,17              | 48,53                                     | 8,41                                       | 0,0061                                       |
| dez/15       | 0,18              | 34,03                                     | 6,01                                       | 0,0045                                       |
| jan/16       | 0,18              | 49,65                                     | 8,89                                       | 0,0066                                       |
| fev/16       | 0,20              | 47,73                                     | 9,48                                       | 0,0066                                       |
| mar/16       | 0,20              | 43,71                                     | 8,94                                       | 0,0067                                       |
| abr/16       | 0,19              | 48,37                                     | 9,12                                       | 0,0068                                       |
| mai/16       | 0,18              | 47,86                                     | 8,42                                       | 0,0063                                       |
| <b>Total</b> |                   |                                           |                                            | <b>0,07</b>                                  |

Fonte: a autora.

**Tabela 17 - Perda de massa de  $\text{Ca}^{+2}$  através do Dreno 2.**

| Mês          | Vazão média (L/h) | Teor de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviado (mg/L) | Massa de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (mg/h) | Massa de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (kg/mês) |
|--------------|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| jun/15       | 22,75             | 13,25                                     | 301,49                                     | 0,2171                                       |
| jul/15       | 22,90             | 13,81                                     | 316,28                                     | 0,2353                                       |
| ago/15       | 21,92             | 45,71                                     | 1001,75                                    | 0,7453                                       |
| set/15       | 21,01             | 43,01                                     | 903,50                                     | 0,6505                                       |
| out/15       | 19,65             | 50,15                                     | 985,26                                     | 0,7330                                       |
| nov/15       | 19,43             | 48,17                                     | 935,86                                     | 0,6738                                       |
| dez/15       | 18,06             | 31,34                                     | 566,04                                     | 0,4211                                       |
| jan/16       | 20,56             | 50,61                                     | 1040,78                                    | 0,7743                                       |
| fev/16       | 20,88             | 45,80                                     | 956,30                                     | 0,6656                                       |
| mar/16       | 21,58             | 32,61                                     | 703,80                                     | 0,5236                                       |
| abr/16       | 20,77             | 46,87                                     | 973,15                                     | 0,7240                                       |
| mai/16       | 20,45             | 45,25                                     | 925,14                                     | 0,6883                                       |
| <b>Total</b> |                   |                                           |                                            | <b>7,05</b>                                  |

Fonte: a autora.

**Tabela 18 - Perda de massa de  $\text{Ca}^{+2}$  através do Dreno 3.**

| Mês    | Vazão média (L/h) | Teor de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviado (mg/L) | Massa de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (mg/h) | Massa de $\text{Ca}^{+2}$ lixiviada (kg/mês) |
|--------|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| jun/15 | 52,21             | 11,81                                     | 616,59                                     | 0,4439                                       |
| jul/15 | 51,88             | 13,49                                     | 700,06                                     | 0,5208                                       |
| ago/15 | 51,05             | 48,59                                     | 2480,39                                    | 1,8454                                       |
| set/15 | 49,85             | 41,01                                     | 2044,62                                    | 1,4721                                       |
| out/15 | 48,43             | 53,27                                     | 2579,85                                    | 1,9194                                       |
| nov/15 | 48,21             | 50,23                                     | 2421,56                                    | 1,7435                                       |

| Mês          | Vazão média (L/h) | Teor de Ca+2<br>lixiviado (mg/L) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (mg/h) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (kg/mês) |
|--------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| dez/15       | 46,24             | 18,23                            | 842,96                            | 0,6272                              |
| jan/16       | 48,65             | 51,89                            | 2524,61                           | 1,8783                              |
| fev/16       | 48,79             | 51,44                            | 2510,11                           | 1,7470                              |
| mar/16       | 49,51             | 49,89                            | 2470,39                           | 1,8380                              |
| abr/16       | 49,30             | 52,21                            | 2573,89                           | 1,9150                              |
| mai/16       | 49,16             | 52,61                            | 2586,04                           | 1,9240                              |
| <b>Total</b> |                   |                                  |                                   | <b>17,87</b>                        |

Fonte: a autora.

**Tabela 19 - Perda de massa de Ca<sup>+2</sup> através do Dreno 4.**

| Mês          | Vazão média (L/h) | Teor de Ca+2<br>lixiviado (mg/L) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (mg/h) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (kg/mês) |
|--------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| jun/15       | 136,65            | 13,57                            | 1854,40                           | 1,3352                              |
| jul/15       | 135,16            | 13,81                            | 1867,01                           | 1,3891                              |
| ago/15       | 133,13            | 46,83                            | 6233,93                           | 4,6380                              |
| set/15       | 130,12            | 29,41                            | 3827,26                           | 2,7556                              |
| out/15       | 126,56            | 52,27                            | 6614,64                           | 4,9213                              |
| nov/15       | 125,06            | 47,21                            | 5903,65                           | 4,2506                              |
| dez/15       | 121,02            | 36,72                            | 4444,22                           | 3,3065                              |
| jan/16       | 126,31            | 46,45                            | 5867,61                           | 4,3655                              |
| fev/16       | 127,93            | 45,94                            | 5877,10                           | 4,0905                              |
| mar/16       | 129,10            | 48,61                            | 6276,14                           | 4,6695                              |
| abr/16       | 128,21            | 46,05                            | 5903,99                           | 4,3926                              |
| mai/16       | 126,81            | 45,73                            | 5798,95                           | 4,3144                              |
| <b>Total</b> |                   |                                  |                                   | <b>44,43</b>                        |

Fonte: a autora.

**Tabela 20 - Perda de massa de Ca<sup>+2</sup> através do Dreno 5.**

| Mês          | Vazão média (L/h) | Teor de Ca+2<br>lixiviado (mg/L) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (mg/h) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (kg/mês) |
|--------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| jun/15       | 2,13              | 12,88                            | 27,43                             | 0,0198                              |
| jul/15       | 2,08              | 13,71                            | 28,52                             | 0,0212                              |
| ago/15       | 2,02              | 47,04                            | 95,12                             | 0,0708                              |
| set/15       | 1,95              | 37,81                            | 73,72                             | 0,0531                              |
| out/15       | 1,80              | 51,89                            | 93,60                             | 0,0696                              |
| nov/15       | 1,78              | 48,53                            | 86,45                             | 0,0622                              |
| dez/15       | 1,64              | 34,03                            | 55,74                             | 0,0415                              |
| jan/16       | 1,80              | 49,65                            | 89,52                             | 0,0666                              |
| fev/16       | 1,83              | 47,73                            | 87,40                             | 0,0608                              |
| mar/16       | 1,86              | 43,71                            | 81,32                             | 0,0605                              |
| abr/16       | 1,81              | 48,37                            | 87,67                             | 0,0652                              |
| mai/16       | 1,75              | 47,86                            | 83,79                             | 0,0623                              |
| <b>Total</b> |                   |                                  |                                   | <b>0,65</b>                         |

Fonte: a autora.

**Tabela 21 – Perda de massa de Ca<sup>+2</sup> através do Dreno 1-b.**

| Mês    | Vazão média (L/h) | Teor de Ca+2<br>lixiviado (mg/L) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (mg/h) | Massa de Ca+2<br>lixiviada (kg/mês) |
|--------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| jun/15 | 12,49             | 12,88                            | 160,83                            | 0,1158                              |
| jul/15 | 12,39             | 13,71                            | 169,87                            | 0,1264                              |
| ago/15 | 11,66             | 47,04                            | 548,63                            | 0,4082                              |
| set/15 | 10,80             | 37,81                            | 408,29                            | 0,2940                              |
| out/15 | 9,72              | 47,59                            | 462,43                            | 0,3440                              |

| Mês          | Vazão média (L/h) | Teor de Ca <sup>+2</sup> lixiviado (mg/L) | Massa de Ca <sup>+2</sup> lixiviada (mg/h) | Massa de Ca <sup>+2</sup> lixiviada (kg/mês) |
|--------------|-------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| nov/15       | 9,54              | 48,53                                     | 463,01                                     | 0,3334                                       |
| dez/15       | 8,73              | 34,03                                     | 296,99                                     | 0,2210                                       |
| jan/16       | 10,20             | 48,21                                     | 491,78                                     | 0,3659                                       |
| fev/16       | 10,23             | 47,73                                     | 488,25                                     | 0,3398                                       |
| mar/16       | 10,62             | 38,05                                     | 404,25                                     | 0,3008                                       |
| abr/16       | 10,30             | 48,37                                     | 498,25                                     | 0,3707                                       |
| mai/16       | 9,76              | 42,85                                     | 418,22                                     | 0,3112                                       |
| <b>Total</b> |                   |                                           |                                            | <b>3,53</b>                                  |

Fonte: a autora.

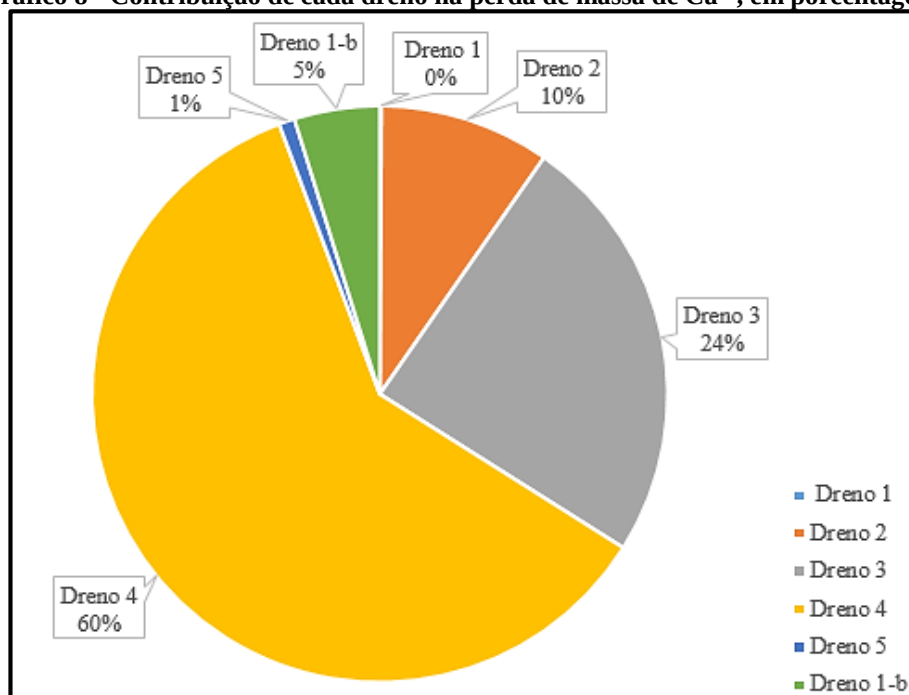
A Tabela 22, a seguir, apresenta o total da perda de massa de íon cálcio no período estudado. O Gráfico 7, por sua vez, ilustra a contribuição fornecida por cada dreno para o desenvolvimento da formação de eflorescências na galeria, ou seja, para a lixiviação do cálcio presente da pasta do concreto.

**Tabela 22 - Perda de massa de Ca<sup>+2</sup> total no decorrer do ano em análise.**

| Dreno        | Massa de Ca <sup>+2</sup> lixiviada (kg/ano) |
|--------------|----------------------------------------------|
| 1            | 0,07                                         |
| 2            | 7,05                                         |
| 3            | 17,87                                        |
| 4            | 44,43                                        |
| 5            | 0,65                                         |
| 1-b          | 3,53                                         |
| <b>Total</b> | <b>73,61</b>                                 |

Fonte: a autora.

**Gráfico 8 - Contribuição de cada dreno na perda de massa de Ca<sup>+2</sup>, em porcentagem.**



Fonte: a autora.

É importante frisar que o valor total aproximado de íon cálcio extraído do concreto no intervalo de análise do presente trabalho (doze meses), demonstrado na Tabela 22, ainda não representa a massa total lixiviada. Uma vez que, conforme citado no capítulo dois, o processo de hidrólise dos componentes da pasta de cimento é responsável pela dissolução de produtos da pasta, principalmente aqueles compostos por cálcio. Por sua maior solubilidade, o produto de cálcio mais suscetível a dissolução é o hidróxido de cálcio. No entanto, quando este já não se encontra superficialmente disponível no contato água-pasta, podem ser levados silicatos de cálcio, ou mesmo sulfoaluminatos de cálcio, ainda que estes sejam menos solúveis.

Logo, a mensuração de massa realizada inclui apenas o teor de íons cálcio, sem considerar hidróxidos, silicatos e sulfatos também liberados pela sua hidrólise, o que significa que a massa efetivamente extraída do concreto é maior que a calculada. No entanto, ela já serve de parâmetro para a observação da extensão do problema.

## 5.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

Os resultados alcançados por meio dos ensaios realizados para a observação das propriedades do concreto do paramento da Eclusa 1, no Bloco 1-A1, bem como no 1-C1 (no caso da esclerometria), estão relatados nos subcapítulos seguintes.

### 5.2.1 Ensaio não-destrutivo (Esclerometria)

Através do ensaio de esclerometria, obteve-se os resultados demonstrados nas Tabelas 23 e 24, representando os Blocos 1-A1 e 1-C1, respectivamente. No intuito de facilitar a observação dos valores para a resistência à compressão equivalente em cada faixa de ensaio, nas referidas tabelas, a faixa “topo” foi disposta em amarelo, a “meio” em azul e a “fundo” em verde.

**Tabela 23 - Resultados do ensaio de esclerometria no Bloco 1-A1.**

| Ponto de estudo | Faixa de ensaio | Posição do aparelho | IE Médio | Coefficiente de correção (k) | IE Efetivo (IEe) | Resistência a compressão equivalente (MPa) |
|-----------------|-----------------|---------------------|----------|------------------------------|------------------|--------------------------------------------|
| P1              | Topo            | Horizontal          | 26,22    | 0,93                         | 24,37            | 15,45                                      |
| P2              | Meio            | Horizontal          | 37,69    | 0,93                         | 35,03            | 31,70                                      |
| P3              | Topo            | Horizontal          | 27,80    | 0,93                         | 25,84            | 17,53                                      |
| P4              | Meio            | Horizontal          | 38,13    | 0,93                         | 35,43            | 32,37                                      |
| P5              | Fundo           | Horizontal          | 34,60    | 0,93                         | 32,16            | 27,06                                      |
| P6              | Topo            | Horizontal          | 25,85    | 0,93                         | 24,02            | 14,96                                      |

| Ponto de estudo | Faixa de ensaio | Posição do aparelho | IE Médio | Coefficiente de correção (k) | IE Efetivo (IEe) | Resistência a compressão equivalente (MPa) |
|-----------------|-----------------|---------------------|----------|------------------------------|------------------|--------------------------------------------|
| P7              | Meio            | Horizontal          | 26,60    | 0,93                         | 24,72            | 15,94                                      |
| P8              | Fundo           | Horizontal          | 28,29    | 0,93                         | 26,29            | 18,18                                      |
| P9              | Topo            | Horizontal          | 30,63    | 0,93                         | 28,46            | 21,38                                      |
| P10             | Meio            | Horizontal          | 29,56    | 0,93                         | 27,47            | 19,90                                      |
| P11             | Fundo           | Horizontal          | 29,00    | 0,93                         | 26,95            | 19,15                                      |
| P12             | Topo            | Horizontal          | 28,00    | 0,93                         | 26,02            | 17,80                                      |
| P13             | Meio            | Horizontal          | 19,58    | 0,93                         | 18,20            | 7,22                                       |
| P14             | Fundo           | Horizontal          | 25,50    | 0,93                         | 23,70            | 14,51                                      |

Fonte: a autora.

**Tabela 24 - Resultados do ensaio de esclerometria no Bloco 1-C1.**

| Ponto de estudo | Faixa de ensaio | Posição do aparelho | IE Médio | Coefficiente de correção (k) | IE Efetivo (IEe) | Resistência a compressão equivalente (MPa) |
|-----------------|-----------------|---------------------|----------|------------------------------|------------------|--------------------------------------------|
| P1              | Topo            | Horizontal          | 30,58    | 0,93                         | 28,43            | 21,32                                      |
| P2              | Meio            | Horizontal          | 22,90    | 0,93                         | 21,28            | 11,22                                      |
| P3              | Fundo           | Horizontal          | 26,67    | 0,93                         | 24,78            | 16,03                                      |
| P4              | Topo            | Horizontal          | 27,29    | 0,93                         | 25,36            | 16,85                                      |
| P5              | Meio            | Horizontal          | 27,89    | 0,93                         | 25,92            | 17,65                                      |
| P6              | Fundo           | Horizontal          | 24,33    | 0,93                         | 22,62            | 13,02                                      |
| P7              | Topo            | Horizontal          | 26,36    | 0,93                         | 24,50            | 15,62                                      |
| P8              | Meio            | Horizontal          | 26,67    | 0,93                         | 24,78            | 16,03                                      |
| P9              | Fundo           | Horizontal          | 24,73    | 0,93                         | 22,98            | 13,52                                      |
| P10             | Topo            | Horizontal          | 26,00    | 0,93                         | 24,17            | 15,16                                      |
| P11             | Meio            | Horizontal          | 24,36    | 0,93                         | 22,64            | 13,06                                      |
| P12             | Fundo           | Horizontal          | 24,50    | 0,93                         | 22,77            | 13,23                                      |
| P13             | Topo            | Horizontal          | 24,86    | 0,93                         | 23,10            | 13,68                                      |
| P14             | Meio            | Horizontal          | 27,21    | 0,93                         | 25,29            | 16,75                                      |
| P15             | Fundo           | Horizontal          | 24,10    | 0,93                         | 22,40            | 12,72                                      |

Fonte: a autora.

Com o intuito tornar mais clara a observação dos resultados apresentados pelas Tabelas 23 e 24 por faixa de ensaio, foram organizadas as Tabelas 25 e 26, onde estão dispostas a média da resistência equivalente obtida, por faixa, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores encontrados para cada uma. Coeficientes de variação destacados em verde representam dispersão baixa, em amarelo claro dispersão média, em amarelo escuro dispersão alta e em vermelho dispersão muito alta.

**Tabela 25 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados obtidos por meio do ensaio de esclerometria no Bloco 1-A1, por faixa de ensaio.**

| Faixa de ensaio | Resistência média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| Topo            | 17,42                   | 2,54                | 14,58                        |
| Meio            | 21,43                   | 10,72               | 50,01                        |
| Fundo           | 19,73                   | 5,28                | 26,79                        |

Fonte: a autora.

**Tabela 26 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados obtidos por meio do ensaio de esclerometria no Bloco 1-C1, por faixa de ensaio.**

| Faixa de ensaio | Resistência média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coeficiente de Variação (%) |
|-----------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Topo            | 16,53                   | 2,91                | 17,61                       |
| Meio            | 14,94                   | 2,70                | 18,07                       |
| Fundo           | 13,70                   | 1,33                | 9,72                        |

**Fonte:** a autora.

Como pôde ser notado na Tabela 23 e de maneira mais notável na Tabela 25, no Bloco 1-A1 as áreas de ensaio concentradas na faixa “topo” apresentaram resultados para resistência à compressão equivalente inferiores as demais faixas. Contrapondo, a princípio, o que se poderia esperar.

Considerando que as faixas “meio” e “fundo” passam grande parte do ano submersas, estando submetidas ao contato com a água e, conseqüentemente, a lixiviação em maior ou menor grau (não se trata de um processo de deterioração homogêneo para todo o paramento, sendo intensificado em zonas de maior porosidade e permeabilidade), imaginava-se, a priori, que a resistência da faixa topo seria superior, por não estar propensa as mesmas condições de agressão.

No entanto, alguns outros fatores devem ser considerados para uma análise mais apurada destes resultados. Conforme citado por Mehta e Monteiro (2008), o ensaio de esclerometria, por mais adequadamente calibrado que esteja o esclerômetro, possui algumas variâncias justificadas por fatores como, por exemplo:

- a) Dosagem do concreto: o tipo e a quantidade de agregado na mistura são capazes de influenciar largamente os resultados, principalmente quando o intuito do ensaio está firmado na estimativa de resistência;
- b) Uniformidade da superfície: o ensaio deve preferencialmente ser executado sobre superfície lisa, livre da exposição de agregados. No presente trabalho, em alguns pontos, por mais que a superfície fosse lixada, foi impossível fugir, em todos os 16 pontos (inseridos no quadrado de 20 x 20 cm feito em cada região de ensaio), de agregados expostos;

- c) Carbonatação superficial: o carbonato de cálcio, produto da carbonatação, é um composto rígido, capaz de aumentar o índice de reflexão. Logo, o esclerômetro acaba por apresentar resultados acima dos reais para a estrutura;
- d) Localização do êmbolo: se o êmbolo for posicionado sobre um agregado rígido ou um grande vazio do concreto resultados incorretos serão apresentados. Por isso, foram utilizadas 16 medições por ponto de análise, descartando todo valor que se distanciasse mais que 10% de um valor médio.

E ainda, a ABNT NBR 7584:2012 cita algumas outras condições que podem acarretar variabilidade nos resultados, dentre elas:

- a) Umidade da superfície: quando úmida, uma superfície pode subestimar a qualidade do concreto, indicando valores de resistência até 20% inferiores àqueles indicados para o concreto seco;
- b) Carbonatação: também citada por Mehta e Monteiro (2008), é capaz de superestimar a resistência do concreto e, em casos extremos, superar os valores reais em mais de 50% em função da espessura da camada carbonatada;
- c) Idade do concreto: a condição normalizada de ensaio é a sua realização aos 28 dias da estrutura, idades superiores a esta podem estar influenciadas por diversos fatores, como a diferença de cura, a carbonatação e outros;
- d) Proximidade entre a área de ensaio e uma falha no concreto.

Logo, uma provável justificativa para a resistência média do concreto na faixa “topo” do Bloco 1-A1 ser inferior àquela encontrada para as faixas “meio” e “fundo” é o fato de que, considerando estas últimas submetidas ao processo de lixiviação, como citado anteriormente, elas possivelmente estão mais porosas e, por isso, mais suscetíveis a carbonatação, levando a um aumento superficial de suas resistências.

Além disto, não se pode deixar de citar a maior irregularidade e exposição de agregados destas faixas em relação a “topo”. Agregados muito próximos a superfície são

capazes de influenciar diretamente o valor de reflexão (índice esclerométrico), tornando-o falsamente superior ao que seria se representasse apenas o impacto sobre a argamassa. Isto explica, inclusive, a grande dispersão dos resultados encontrados para as faixas “meio” e “fundo” do Bloco 1-A1, como observado na Tabela 25.

Por outro lado, ao concentrar a atenção nos resultados encontrados para o Bloco 1-C1 (gêmeo do Bloco 1-A1, mas onde não ocorre a lixiviação de maneira tão notável), demonstrados nas Tabelas 24 e 26, observa-se uma maior homogeneidade dos valores, que seguem uma linha mais lógica. Diz-se isto porque a faixa “topo”, exposta durante todo o ano ao ambiente e não submetida ao contato frequente com a água do reservatório, apresenta a maior média de resistência à compressão equivalente, seguida das faixas “meio” e “fundo”, mais propensas aos mecanismos de deterioração desencadeados pela água e, por isso, provavelmente mais porosas e consequentemente com resistências inferiores.

Ainda que não afetado expressivamente pela lixiviação, o paramento do Bloco 1-C1 está exposto pelo mesmo período que o Bloco 1-A1 a água do reservatório, e não se encontra em melhor condição que este último quando se trata de desgaste superficial, pelo menos partindo de uma análise visual. Situações como está são capazes de justificar também de justificar a redução gradativa da resistência equivalente com a profundidade.

No subcapítulo 2.3.3.1, a respeito dos dados do concreto analisado, foi apresentado o traço aplicado no paramento que tinha resistência prevista de 15 MPa aos 28 dias, chegando no controle tecnológico a atingir 27,8 MPa aos 90 dias. Considerando que as condições de adensamento e cura durante a obra diferem um pouco em relação aquelas aplicadas em laboratório e que o concreto é um material que tende a aumentar sua resistência ao longo do tempo, os resultados apresentados nas Tabelas 25 e 26 para os Blocos 1-A1 e 1-C1, respectivamente, são aqui considerados dentro de um intervalo plausível de valores. Uma vez que, todos se apresentaram próximos ou superiores a resistência de projeto para o concreto analisado.

Como dito por Malhotra (1984, *apud* MEHTA & MONTEIRO, 2008), a precisão de um esclerômetro de reflexão calibrado na estimativa de resistência em campo de uma estrutura de concreto varia para mais ou para menos 25%. Logo, o ensaio de esclerometria não é um método conclusivo para a obtenção da resistência do concreto, principalmente de

um com idade tão avançada, servindo apenas para uma estimativa da mesma. Por isso, fez-se uso também nesta pesquisa da extração de testemunhos.

### 5.2.2 Resultados dos ensaios realizados a partir da extração dos testemunhos

Com a execução do ensaio destrutivo, em questão a extração de testemunhos do Bloco 1-A1, fez-se possível realizar alguns ensaios, entre eles a determinação da profundidade de carbonatação, a estimativa empírica do desgaste superficial, o teste de resistência à compressão axial, a determinação da absorção de água, bem como do índice de vazios e da massa específica, e a verificação da microestrutura com o auxílio do MEV, cujos resultados estão apresentados a seguir.

#### 5.2.2.1 Determinação da profundidade de carbonatação e estimativa do desgaste superficial

Os valores encontrados a partir da medição da profundidade de carbonatação dos testemunhos extraídos estão apresentados na Tabela 27. Os resultados destacados em amarelo representam a faixa “topo”, em azul a faixa “meio” e em verde a faixa “fundo”.

**Tabela 27 - Profundidades de carbonatação medidas nos quatro pontos equidistantes de cada testemunho extraído.**

| Amostra | Data de extração | Faixa de extração | Profundidade de 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  |

**Fonte:** a autora.

Como pôde ser observado na tabela anterior, a faixa de extração “topo” apresentou os maiores valores para profundidade de carbonatação, sendo estes praticamente o dobro da faixa subsequente (“meio”), que por sua vez apresentou resultados próximos aos da última faixa, “fundo”. Para a melhor observação da diferença entre os valores alcançados para cada faixa analisada foi composta a Tabela 28, abaixo. Vale observar que, em sua elaboração, o

resultado da amostra A-5 foi descartado, devido a sua extrema disparidade em relação aos demais, algo que será melhor explicado adiante.

**Tabela 28 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação das profundidades de carbonatação obtidas para os testemunhos de cada faixa de extração.**

| Faixa de extração | Profundidade de carbonatação média (mm) | Desvio Padrão (MPa) | Coeficiente de Variação (%) |
|-------------------|-----------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Topo              | 52,35                                   | 2,34                | 4,48                        |
| Meio              | 22,25                                   | 4,60                | 20,67                       |
| Fundo             | 15,97                                   | 5,04                | 31,58                       |

**Fonte:** a autora.

A Tabela 28, mostrada anteriormente, permite notar de maneira mais evidente a linearidade dos resultados obtidos por faixa de estudo, ou seja, o fato da faixa “topo” ter apresentado a maior média, seguida da faixa “meio” e esta da faixa “fundo”.

Essa sequência pode ser facilmente explicada pela exposição destas regiões ao ambiente. A faixa “topo” se mantém durante todo o ano exposta ao ar atmosférico, ficando propensa a ação do CO<sub>2</sub> perante à pasta de cimento. A faixa “meio”, por sua vez, fica poucos meses por ano sobre a mesma exposição, bem como a faixa “fundo”, daí advém seus valores próximos.

A pequena diferença entre estas duas últimas faixas pode ser justificada pelo período em que foram realizadas as extrações: a água do reservatório havia acabado de “liberar” a faixa “fundo”, enquanto que faixa “meio” já se encontrava exposta a mais tempo, considerando que a redução do nível da água é lenta e gradual.

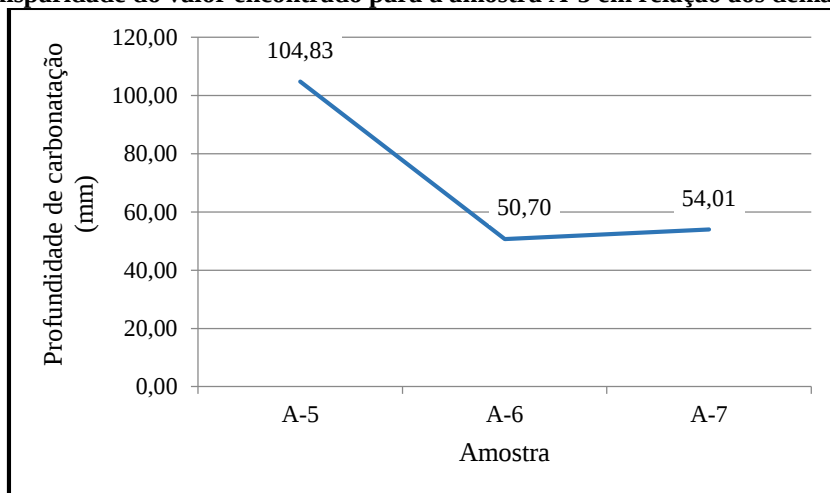
No que tange ao Coeficiente de Variação apresentado na Tabela 28, a faixa “fundo” foi a única que apresentou uma dispersão considerada muito alta (destacada em vermelho), assim como ocorreria com a faixa topo, caso o resultado da amostra A-5 não fosse extraído. As demais, apresentaram variações aceitáveis (em amarelo escuro, dispersão alta, e em verde, dispersão baixa). No caso da faixa “fundo”, a grande dispersão está justificada pelo valor encontrado para a amostra A-4.

Estas duas amostras possuem, provavelmente, ocorrências locais peculiares, que dão razão a seus resultados. Por exemplo, um mal adensamento do concreto nessas regiões em específico, ou o aparecimento de fissuras nelas durante a cura, pode ter levado a uma maior

porosidade, facilitando o acesso do dióxido de carbono e, conseqüentemente, ampliando a frente de carbonatação em relação aos outros pontos analisados da mesma faixa.

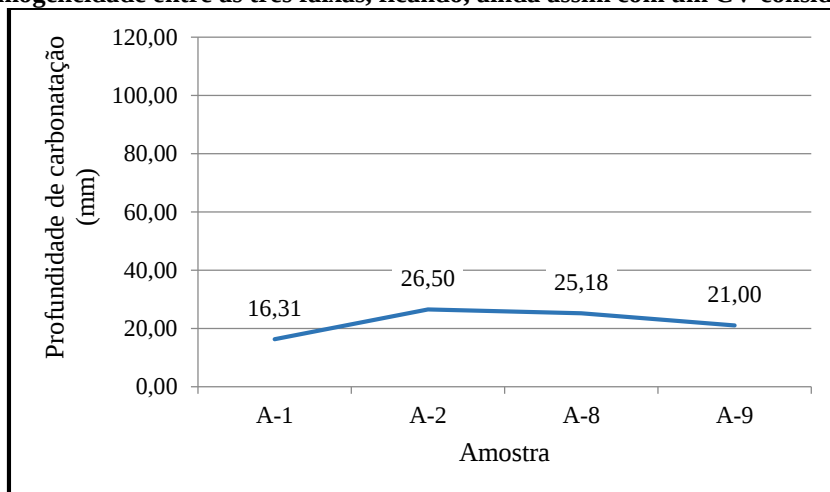
Para tornar mais visível a homogeneidade dos resultados encontrados para cada faixa de extração, estão apresentados abaixo os Gráficos 9, 10 e 11.

**Gráfico 9 - Resultados da profundidade de carbonatação por amostra da faixa “Topo”, expondo a disparidade do valor encontrado para a amostra A-5 em relação aos demais.**



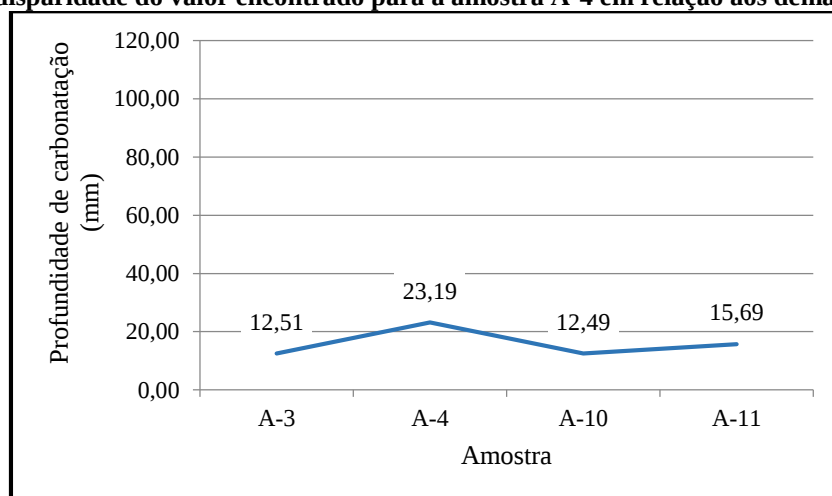
Fonte: a autora.

**Gráfico 10 - Resultados da profundidade de carbonatação por amostra da faixa “Meio”, que apresentou a maior homogeneidade entre as três faixas, ficando, ainda assim com um CV considerado alto.**



Fonte: a autora.

**Gráfico 11 - Resultados da profundidade de carbonatação por amostra da faixa “Fundo”, explicitando a disparidade do valor encontrado para a amostra A-4 em relação aos demais.**



Fonte: a autora.

Quanto aos resultados da mensuração empírica da extensão do desgaste superficial dos testemunhos extraídos abaixo do nível máximo de água (cota 74,00 m), em relação àqueles extraídos acima deste, encontram-se dispostos na Tabela 29. Nela, os testemunhos que representam a faixa “topo” estão dispostos em amarelo, os da faixa “meio” em azul e os da faixa “fundo” em verde.

**Tabela 29: Resultados obtidos a partir da mensuração do desgaste superficial dos testemunhos extraídos abaixo do nível máximo de água.**

| Amostra | Data de extração | Faixa de extração | Desgaste Superficial (mm) |         |         |         | Média |
|---------|------------------|-------------------|---------------------------|---------|---------|---------|-------|
|         |                  |                   | Ponto 1                   | Ponto 2 | Ponto 3 | Ponto 4 |       |
| 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  |

Fonte: a autora.

É possível notar pela Tabela 29 que os valores encontrados para o desgaste superficial foram aparentemente homogêneos entre as amostras analisadas, sejam elas da faixa “meio” ou “fundo”, variando poucos milímetros. Ao se calcular uma média entre todos os resultados tem-se 6,15 mm, com desvio padrão de 1,22 mm e um coeficiente de variação 19,80%, considerado pela literatura como uma dispersão média.

Portanto, pode-se dizer que o desgaste superficial é aproximadamente linear ao longo do paramento do Bloco 1-A1, excetuando apenas a zona acima da cota máxima do reservatório, que não está em contato com a água. Logo, pode-se inferir que sua ocorrência é uma consequência natural do tempo de exposição deste concreto as variações de nível de água, que acabam por hidrolisá-lo e dissolvê-lo gradualmente.

Como citado por Ekström (2003), quanto maior a extensão da região de homogênea percolação de água, mais acelerado o processo de lixiviação. No entanto, quando a face do concreto que serve de entrada para a água se encontra carbonatada (algo comum uma vez que a carbonatação normalmente se desenvolve antes mesmo que a patologia foco deste trabalho inicie) há uma redução na ocorrência desta patologia, considerando o  $\text{CaCO}_3$  formado uma substância de baixa solubilidade em água.

Por outro lado, ela ao invés de ser dificultada pela carbonatação será acelerada caso a água em contato com o concreto possua  $\text{CO}_2$  dissolvido, dando origem ao ácido carbônico, produto capaz de atacar o carbonato de cálcio e produzir bicarbonato de cálcio, um elemento solúvel, que é levado pela água, deixando a superfície aos poucos mais e mais desgastada, como certamente vem ocorrendo no paramento da Eclusa 1. As reações citadas foram demonstradas no subcapítulo 2.2.2, através das Equações 2 e 5.

Como apresentado por Oliveira e Nogueira (2016), onde o mesmo problema foi analisado, o desgaste superficial máximo encontrado nos testemunhos, igual a 10,73 mm, se comparado a largura do muro de ligação (em média 20 m) representa apenas 0,05% desta dimensão, não representando qualquer risco estrutural para o maciço, além de ser um valor muito pequeno se considerada a idade do concreto estudado.

#### 5.2.2.2 *Teste de resistência à compressão*

Por meio do ensaio de compressão axial realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 30, disposta na página seguinte. Nela estão destacados em amarelo os valores obtidos para os testemunhos da faixa “topo”, em azul os da faixa “meio” e em verde os da faixa “fundo”.

**Tabela 30 – Valores obtidos para a resistência à compressão axial dos testemunhos extraídos.**

| Amostra | Faixa de extração | Resistência obtida através do ensaio (MPa) - $f_{ci,ext,inicial}$ | Coefficiente de correção final (K) | Resistência à compressão axial (MPa) - $f_{ci,ext}$ |
|---------|-------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| A-1     | Meio              | 10,55                                                             | 1,11                               | 11,71                                               |
| A-2     | Meio              | 10,37                                                             | 1,11                               | 11,51                                               |
| A-3     | Fundo             | 16,28                                                             | 1,11                               | 18,07                                               |
| A-4     | Fundo             | 12,79                                                             | 1,11                               | 14,20                                               |
| A-5*    | Topo              | 4,20                                                              | 1,11                               | 4,66                                                |
| A-6     | Topo              | 8,69                                                              | 1,11                               | 9,65                                                |
| A-7     | Topo              | 10,40                                                             | 1,11                               | 11,54                                               |
| A-8     | Meio              | 15,28                                                             | 1,11                               | 16,96                                               |
| A-9     | Meio              | 14,12                                                             | 1,11                               | 15,67                                               |
| A-10    | Fundo             | 10,87                                                             | 1,11                               | 12,07                                               |
| A-11    | Fundo             | 13,12                                                             | 1,11                               | 14,56                                               |

\* A amostra A-5 apresentou um resultado extremamente afastado dos demais, provavelmente devido ao seu estado de saturação. Como será mostrado adiante, ela foi utilizada no ensaio de absorção, sendo mantida sob fervura durante 5 horas e, pouco menos que um dia depois, foi submetida à compressão. Daí sua ruptura a uma tensão tão baixa. Diz-se isto porque, quando o corpo-de-prova rompeu, foi possível observar o quão úmido o testemunho estava por dentro. O mesmo erro não se repetiu para as outras amostras utilizadas no ensaio de absorção e, posteriormente, no de ruptura.

**Fonte:** a autora.

Na Tabela 30 foram apresentadas as tensões máximas suportadas por cada amostra ensaiada, já corrigidas pelo coeficiente  $K$ . No entanto, para facilitar a visualização da média encontrada para cada faixa analisada do paramento do Bloco 1-A1, constitui-se a Tabela 31, excluindo o valor da amostra A-5, pelo motivo anteriormente descrito na Tabela 30.

**Tabela 31 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação para os resultados de resistência à compressão axial, por faixa de extração.**

| Faixa de extração | Resistência média (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | Coefficiente de Variação (%) |
|-------------------|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| Topo              | 10,59                   | 1,34                | 12,67                        |
| Meio              | 13,96                   | 2,77                | 19,83                        |
| Fundo             | 14,72                   | 2,49                | 16,90                        |

**Fonte:** a autora.

Como se pôde observar pela Tabela 31, a faixa de extração “topo” apresentou uma média de resistência à compressão inferior a faixa “meio” e esta inferior a faixa “fundo”. Algo inversamente proporcional ao que se poderia esperar. Considerando que, como citado no subcapítulo 5.2.1 (referente aos resultados do ensaio de esclerometria), devido a ocorrência da lixiviação no Bloco 1-A1 da Eclusa 1, espera-se que a resistência do concreto submetido ao contato frequente com a água do reservatório seja inferior àquela do concreto acima da cota 74,0 m, uma vez que esta patologia amplia a porosidade deste material, reduzindo por consequência sua resistência.

No entanto, algumas peculiaridades devem ser frisadas quanto ao ensaio de compressão axial realizado, dentre elas o tamanho dos testemunhos. Conforme explicado no capítulo 4.2.2 (no qual foi explícito o procedimento de extração de corpos-de-prova), tendo conhecimento que o diâmetro máximo do agregado utilizado no concreto do paramento foi de 76 mm, uma extratora com broca de 100 mm não seria a mais adequada. Ainda assim, era o equipamento que estava disponível para a pesquisa.

O fato de existirem agregados de tal dimensão nos corpos de prova, distribuídos de forma irregular em seu reduzido tamanho, pode ter afetado sua resistência, pois sabe-se que testemunhos de concreto tendem a romper no contato pasta-agregado. Logo, quanto maior a extensão deste contato, maior a propensão a ruptura nesta superfície mais frágil sob tensões inferiores a real resistência do concreto.

Além disso, é importante considerar o volume de concreto de um barramento como o muro de ligação da Eclusa 1. A faixa “fundo”, ao longo dos anos, foi muito mais adensada pelas camadas superiores a ela que a faixa “meio” e esta que a faixa “topo”. Assim, o grau de compactidade deste concreto é em muito superior ao destas últimas faixas citadas, podendo influenciar sua resistência.

Como mostrado em capítulos anteriores, a resistência de projeto do concreto do paramento estudado é de 15 MPa aos 28 dias. Nenhuma das faixas alcançaram uma média de resistência igual ou superior a este valor, algo que também pode ser justificado pelas questões citadas anteriormente, principalmente pelo tamanho dos agregados em relação ao dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de compressão axial. No que tange a dispersão dos resultados, demonstrada na Tabela 31 por meio do coeficiente de variação, todas as faixas apresentaram uma dispersão média (destacadas em amarelo claro).

#### *5.2.2.3 Determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica*

A Tabela 32, na página seguinte, demonstra as massas obtidas em cada etapa do ensaio realizado segundo as indicações da ABNT NBR 9778:2005, sendo elas: massa seca, massa submersa após fervura e massa saturada.

**Tabela 32 - Massas obtidas durante o ensaio de absorção, realizado segundo recomendações da ABNT NBR 9778:2005.**

| Amostra | Faixa de extração | Massa seca (kg) | Massa submersa após fervura (Mi) (kg) | Massa saturada (kg) |
|---------|-------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------|
| A-2     | Meio              | 3,5484          | 2,1305                                | 3,6872              |
| A-3     | Fundo             | 3,6991          | 2,286                                 | 3,9088              |
| A-5     | Topo              | 3,744           | 2,3339                                | 3,823               |
| A-6     | Topo              | 3,55242         | 2,1392                                | 3,70934             |
| A-8     | Meio              | 3,62363         | 2,1935                                | 3,76815             |
| A-10    | Fundo             | 3,64634         | 2,2437                                | 3,80442             |

**Fonte:** a autora.

Os valores calculados para a absorção e para o índice de vazios das amostras ensaiadas, bem como a média, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) destes resultados encontram-se dispostos na Tabela 33, já separados por faixa de extração.

**Tabela 33 - Resultados obtidos para a absorção e para o índice de vazios dos testemunhos de concreto.**

| Faixa de extração | Amostra | Absorção (%)    |       |      |       | Índice de vazios (%) |       |      |       |
|-------------------|---------|-----------------|-------|------|-------|----------------------|-------|------|-------|
|                   |         | Valor calculado | Média | DP   | CV    | Valor calculado      | Média | DP   | CV    |
| Topo              | A-5     | 2,11            | 3,26  | 1,63 | 49,99 | 5,31                 | 7,65  | 3,32 | 43,34 |
|                   | A-6     | 4,42            |       |      |       | 9,99                 |       |      |       |
| Meio              | A-2     | 3,91            | 3,95  | 0,05 | 1,37  | 8,92                 | 9,05  | 0,18 | 2,04  |
|                   | A-8     | 3,99            |       |      |       | 9,18                 |       |      |       |
| Fundo             | A-3     | 5,67            | 5,00  | 0,94 | 18,85 | 12,92                | 11,53 | 1,98 | 17,14 |
|                   | A-10    | 4,34            |       |      |       | 10,13                |       |      |       |

**Fonte:** a autora.

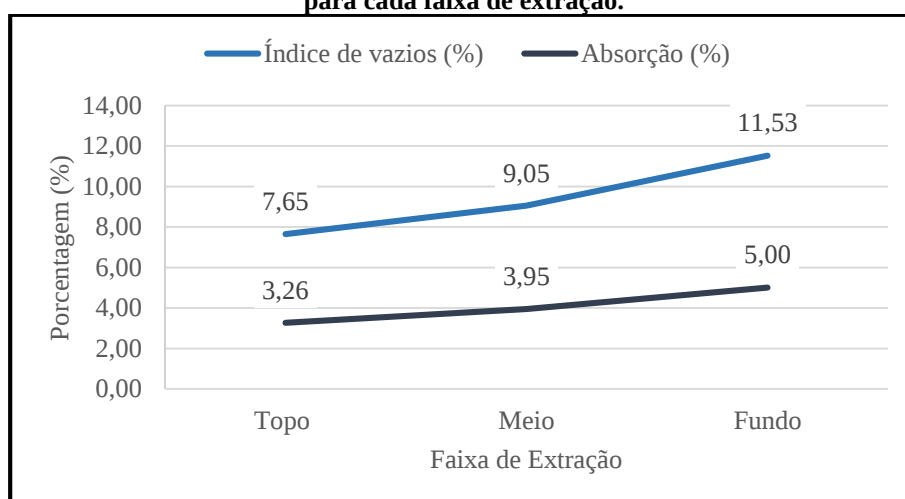
Tanto os valores calculados para a absorção, quanto aqueles obtidos para o índice de vazios, como pôde ser visto na Tabela 33, seguiram proporções semelhantes, tendo uma média máxima entre as amostras da faixa “fundo” e mínima entre as da faixa “topo”. Logo, pode-se inferir que o concreto submetido ao contato frequente com a água do reservatório se encontra mais poroso que aquele que se encontra acima do nível máxima da água e, além disso, quanto maior a profundidade abaixo deste nível, mais poroso se encontra.

A lixiviação decorre da percolação de água pelo concreto, esta, por sua vez, tende a ser naturalmente mais forte com o aumento da profundidade, ao se considerar a ampliação da coluna d’água acima do ponto de infiltração, levando ao aumento de pressão neste. Isso justifica o maior índice de vazios e consequente maior absorção nas faixas “meio” e “fundo”, em especial na faixa “fundo”. O ensaio realizado comprovou esta hipótese.

Como pôde ser também observado na Tabela 33, a dispersão foi baixa na faixa “meio”, média na faixa “fundo” e muito alta na faixa “topo”, tendo seus dois resultados apresentado valores quase que dobrados um em relação ao outro. Há a possibilidade, como dito no subcapítulo 5.2.2.1, de alguma falha local no concreto, talvez por falta de adensamento, ter acarretado sua maior porosidade, dando razão aos valores superestimados da amostra A-6 em relação aos da A-5.

Para uma melhor visualização da linearidade entre os resultados obtidos para o índice de vazios e para a absorção em cada faixa de análise, deve-se observar o Gráfico 12.

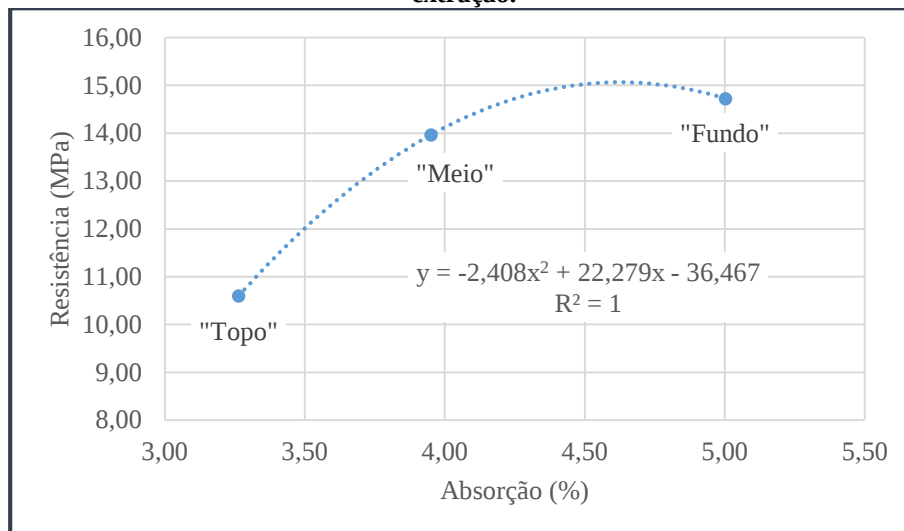
**Gráfico 12 – Demonstração da linearidade entre os resultados da taxa de absorção e do índice de vazios para cada faixa de extração.**



**Fonte: a autora.**

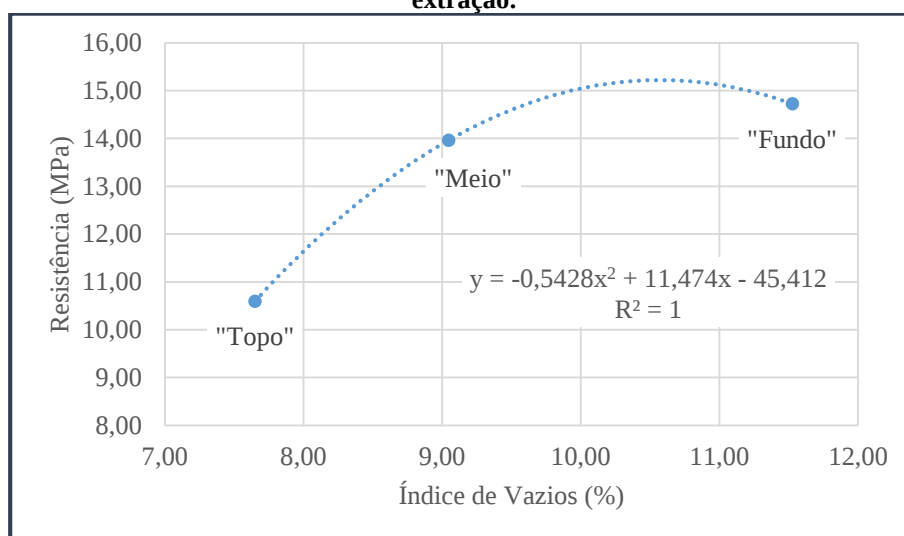
Estabelecendo uma correlação entre a resistência média corrigida obtida por meio do ensaio de compressão axial e a taxa de absorção (Gráfico 13) e esta resistência e o índice de vazios (Gráfico 14) percebe-se uma perfeita relação, com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 1. No entanto, com uma tendência contrária a que se poderia esperar, ou seja, ao invés da resistência decrescer com o aumento da absorção, bem como do índice de vazios, ela teve um acréscimo gradual através das faixas, juntamente com estes outros fatores.

**Gráfico 13 - Correlação entre a taxa de absorção e a resistência à compressão para as diferentes faixas de extração.**



**Fonte: a autora.**

**Gráfico 14 - Correlação entre o índice de vazios e a resistência à compressão para as diferentes faixas de extração.**



**Fonte: a autora.**

Como citado, o aumento ao longo das faixas “topo”, “meio” e “fundo” do percentual de absorção e índice de vazios era previsto. Logo, o problema no sentido da tendência apresentada anteriormente pelos gráficos possivelmente se encontra nos resultados alcançados para a resistência dos testemunhos, cujos prováveis motivos já foram elencados no subcapítulo anterior.

Por indicação da ABNT NBR 9778:2005, foram calculadas ainda a massa específica seca, a saturada e a real para as seis amostras, cujos resultados estão apresentados na Tabela 34, bem como as médias obtidas para cada faixa de extração.

**Tabela 34 - Valores calculados para massa específica seca, saturada e real.**

| Faixa de extração | Amostra | Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> ) |       | Massa específica saturada (g/cm <sup>3</sup> ) |       | Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> ) |       |
|-------------------|---------|--------------------------------------------|-------|------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------|-------|
|                   |         | Calculada                                  | Média | Calculada                                      | Média | Calculada                                  | Média |
| Topo              | A-5     | 2,51                                       | 2,39  | 2,57                                           | 2,46  | 2,66                                       | 2,58  |
|                   | A-6     | 2,26                                       |       | 2,36                                           |       | 2,51                                       |       |
| Meio              | A-2     | 2,28                                       | 2,29  | 2,37                                           | 2,38  | 2,50                                       | 2,52  |
|                   | A-8     | 2,30                                       |       | 2,39                                           |       | 2,53                                       |       |
| Fundo             | A-3     | 2,28                                       | 2,31  | 2,41                                           | 2,42  | 2,62                                       | 2,61  |
|                   | A-10    | 2,34                                       |       | 2,44                                           |       | 2,60                                       |       |

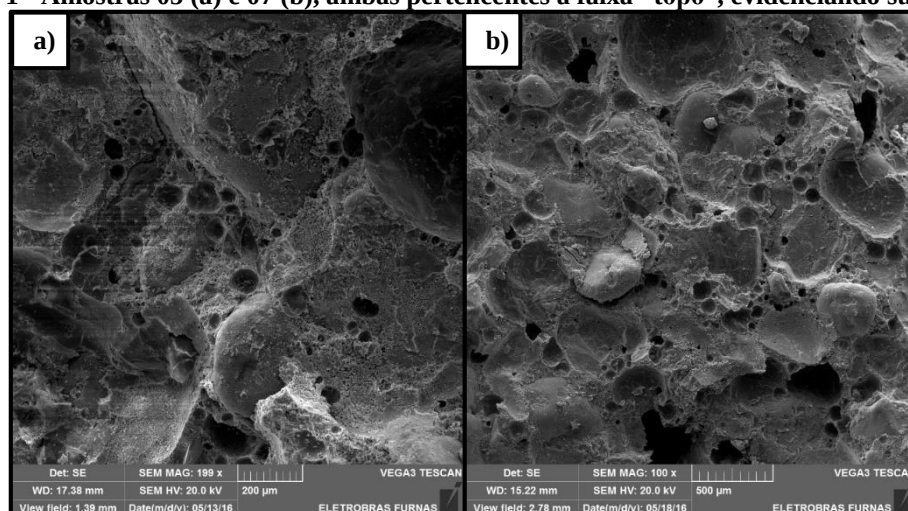
**Fonte:** a autora.

Com relação as massas específicas calculadas para as seis amostras ensaiadas, como demonstrado na Tabela 34, obteve-se valores próximos nas médias das três faixas de extração, havendo pouquíssima variação entre elas. Este cálculo teve apenas caráter complementar para o presente trabalho.

#### 5.2.2.4 Análise da microestrutura do concreto extraído

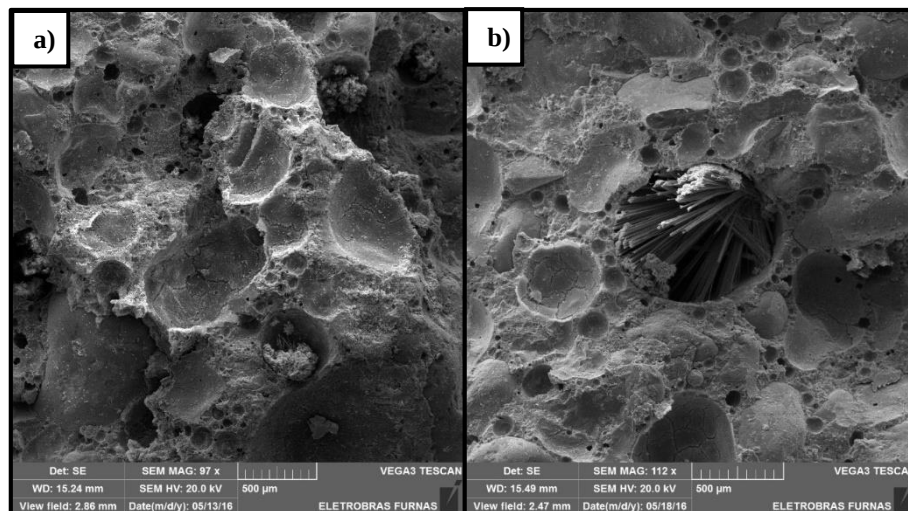
As Micrografias 1 e 2, dispostas abaixo, demonstram uma visão geral das amostras das faixas de extração “topo” e “fundo”, respectivamente, para uma análise quanto a porosidade destas regiões, partindo de um campo de observação da ordem de 2,8 a 2,4 mm.

**Micrografia 1 - Amostras 05 (a) e 07 (b), ambas pertencentes a faixa “topo”, evidenciando sua porosidade.**



**Fonte:** a autora.

**Micrografia 2 - Amostras 03 (a) e 11 (b), pertencentes a faixa “fundo”, evidenciando sua porosidade.**



**Fonte: a autora.**

Como foi possível observar nas micrografias, tanto as amostras da faixa “topo”, não exposta a lixiviação e ao contato frequente com a água do reservatório, quanto as da faixa “fundo”, mais propensa a tais condições, se encontram muito porosas, com poros bem distribuídos e de diferentes dimensões.

Não se pode deixar de notar a perfeita formação esférica da maioria destes poros, fato que pode indicar sua origem na concretagem, surgindo devido ao uso de aditivo incorporador de ar no traço do concreto estudado (como demonstrado na Tabela 1 do subcapítulo 3.3.1) e não necessariamente ao desenvolvimento de qualquer patologia.

Logo, não é possível afirmar, como previsto, que devido a ocorrência da lixiviação as amostras da faixa “fundo” se encontram mais porosas que as da faixa “topo” (referência). Na verdade, aparentemente, essas duas faixas possuem uma quantidade semelhante de poros. No entanto, o que se pode notar de diferente entre as micrografias é que na Micrografia 1 os poros estão mais vazios, enquanto que na Micrografia 2, em grande parte deles, observa-se a formação de produtos.

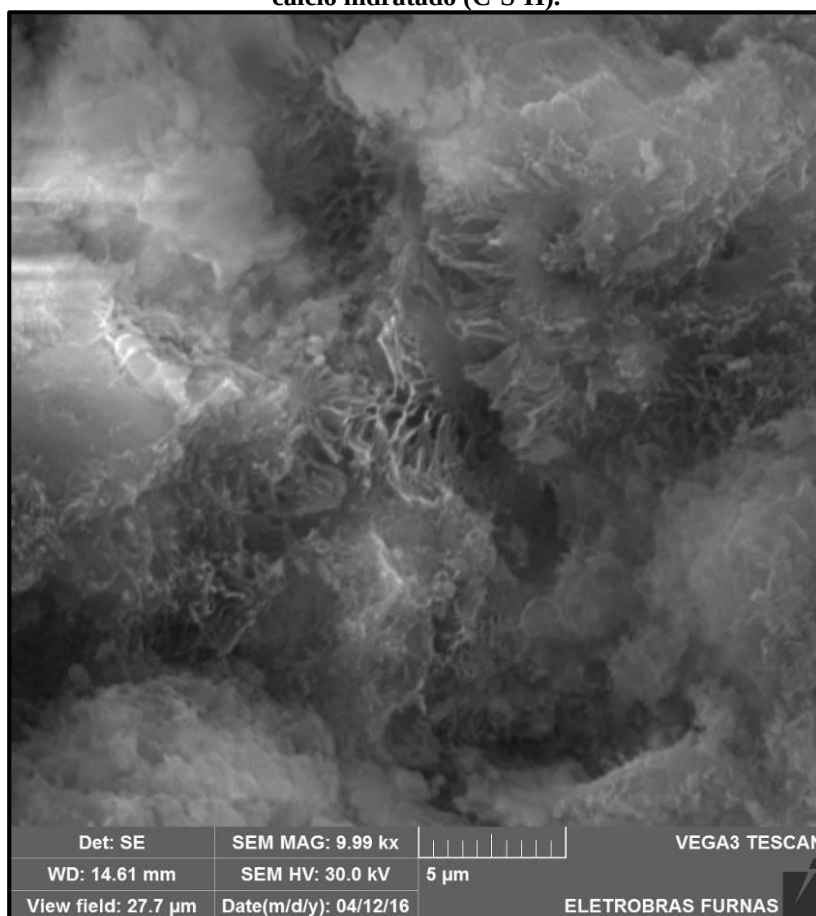
Como exemplo disso, na Micrografia 2-b, pode-se observar claramente, no interior de um dos poros, a formação de etringita secundária, caracterizada pelas estruturas intertravadas em formato de agulhas. Normalmente, ela se desenvolve no concreto já

endurecido, na presença de umidade, recristalizando a etringita dentro dos vazios e originando cristais maiores.

No que tange aos componentes da pasta de cimento notados durante a investigação microscópica, serão mais detalhadamente apresentados a seguir alguns dos resultados do MEV e do EDS para as amostras analisadas, individualmente, a começar pelas amostras da faixa de extração “topo”.

A amostra 05 tem seus resultados apresentados nas Micrografias 3, 4 e 5, sendo que as Micrografias 4 e 5 encontram-se acompanhadas de análises por EDS dos pontos nelas destacados (Espectros 1 e 2, respectivamente). Na sequência, estão os resultados da amostra 07, também pertencente a faixa “topo”, mostrados por meio das Micrografias 6, 7 e 8, bem como dos Espectros 3, 4, 5 e 6, apresentados para as Micrografias 6 e 7, sendo dois para cada uma delas, respectivamente.

**Micrografia 3 – Amostra 05 (topo): ao centro, pode-se observar uma formação característica de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).**



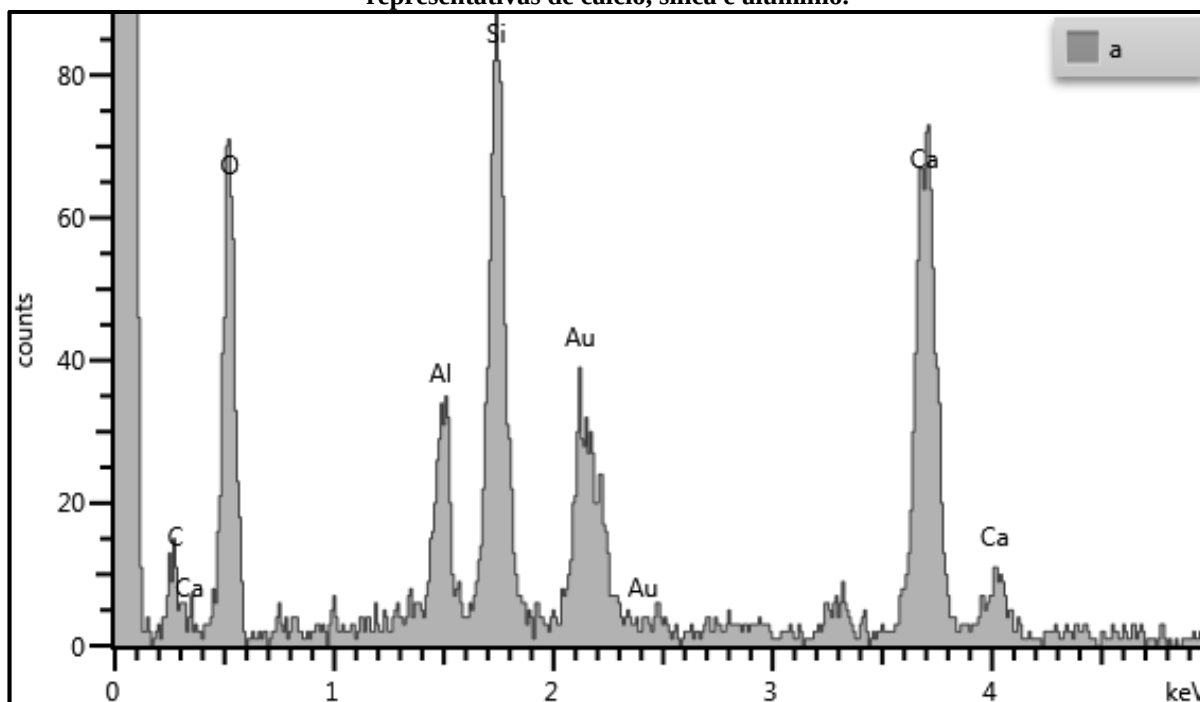
Fonte: a autora.

**Micrografia 4 - Amostra 05 (Topo): visão da superfície da amostra, demonstrando possíveis sílico-aluminatos de cálcio.**



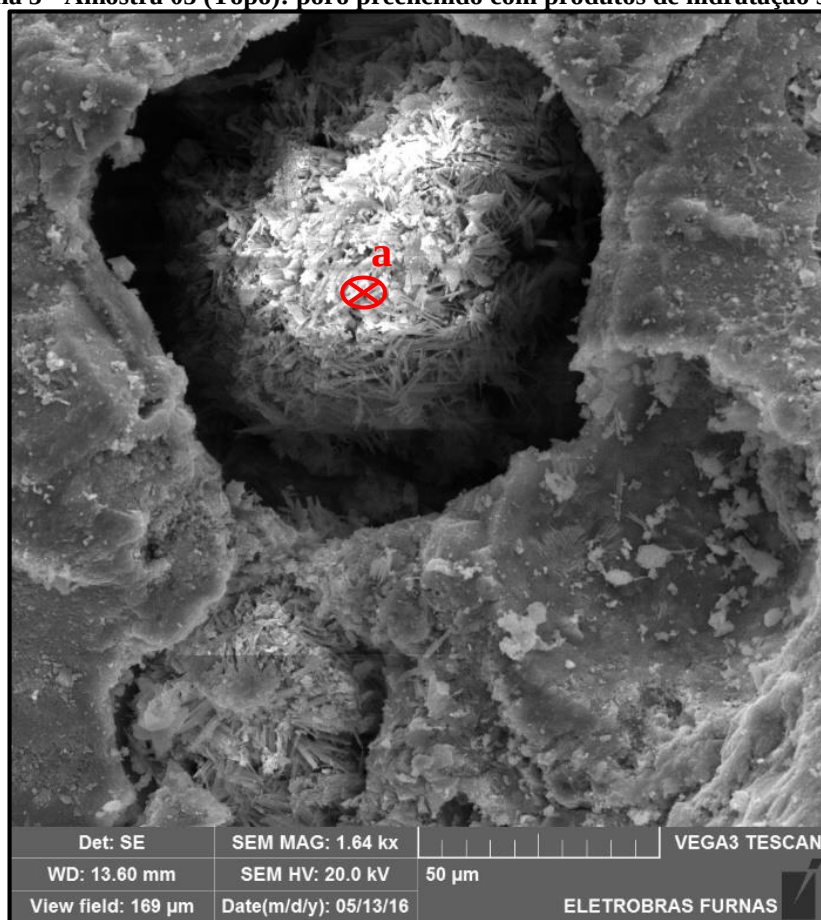
Fonte: a autora.

**Espectro 1 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 4, ressaltando taxas representativas de cálcio, sílica e alumínio.**



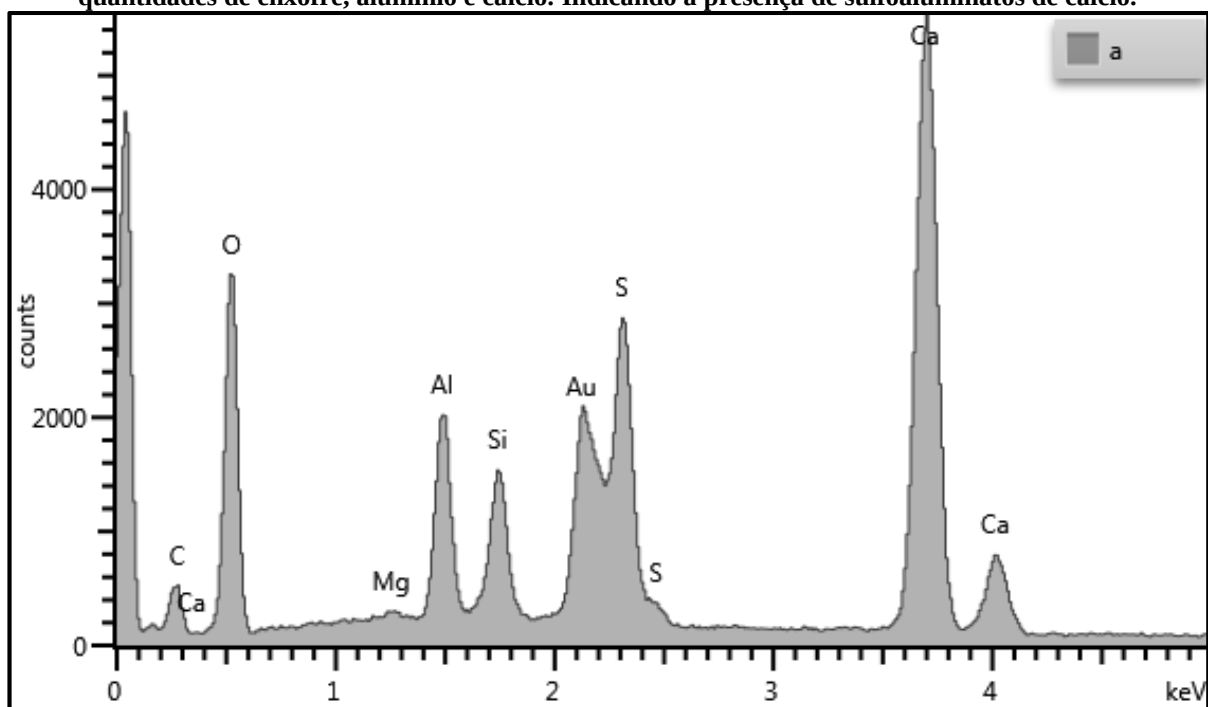
Fonte: a autora.

**Micrografia 5 - Amostra 05 (Topo): poro preenchido com produtos de hidratação secundária.**



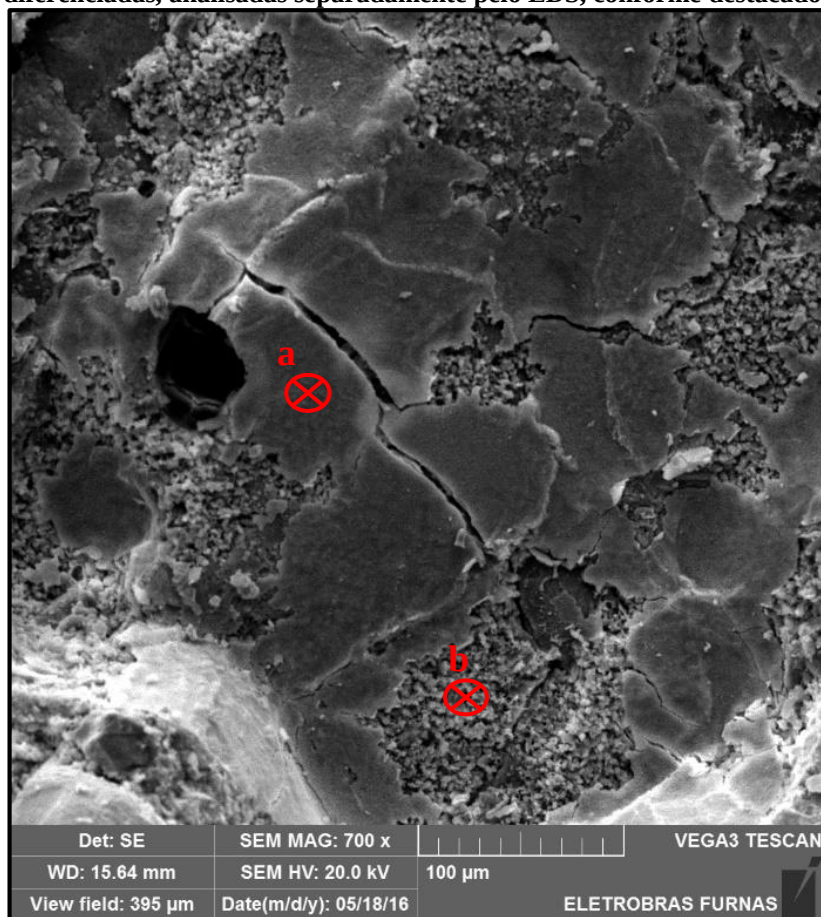
Fonte: a autora.

**Espectro 2 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 5, ressaltando grandes quantidades de enxofre, alumínio e cálcio. Indicando a presença de sulfoaluminatos de cálcio.**



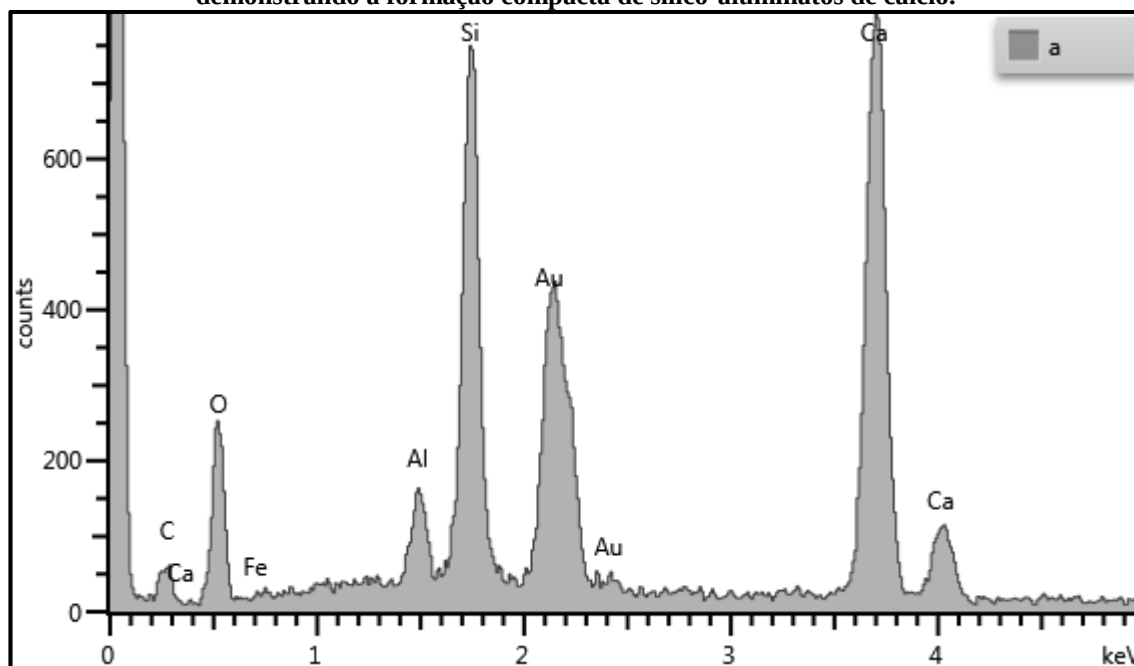
Fonte: a autora.

**Micrografia 6 - Amostra 07 (Topo):** vista da superfície da amostra, indicando poros e formações diferenciadas, analisadas separadamente pelo EDS, conforme destacado.



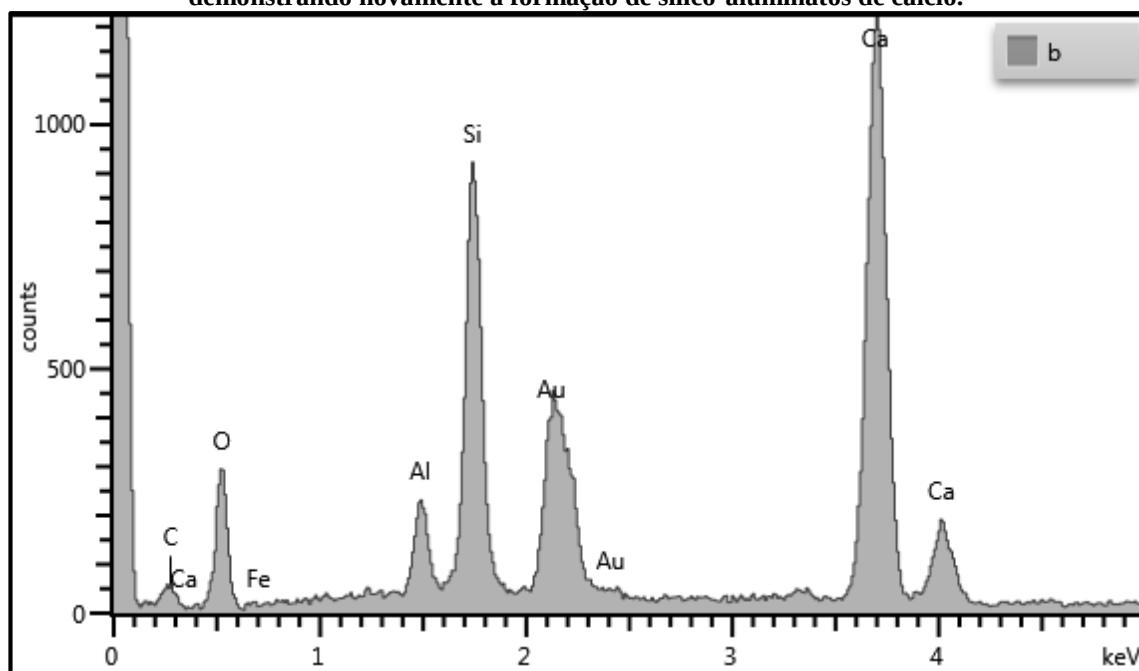
Fonte: a autora.

**Espectro 3 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 6, ponto “a”, demonstrando a formação compacta de sílico-aluminatos de cálcio.**



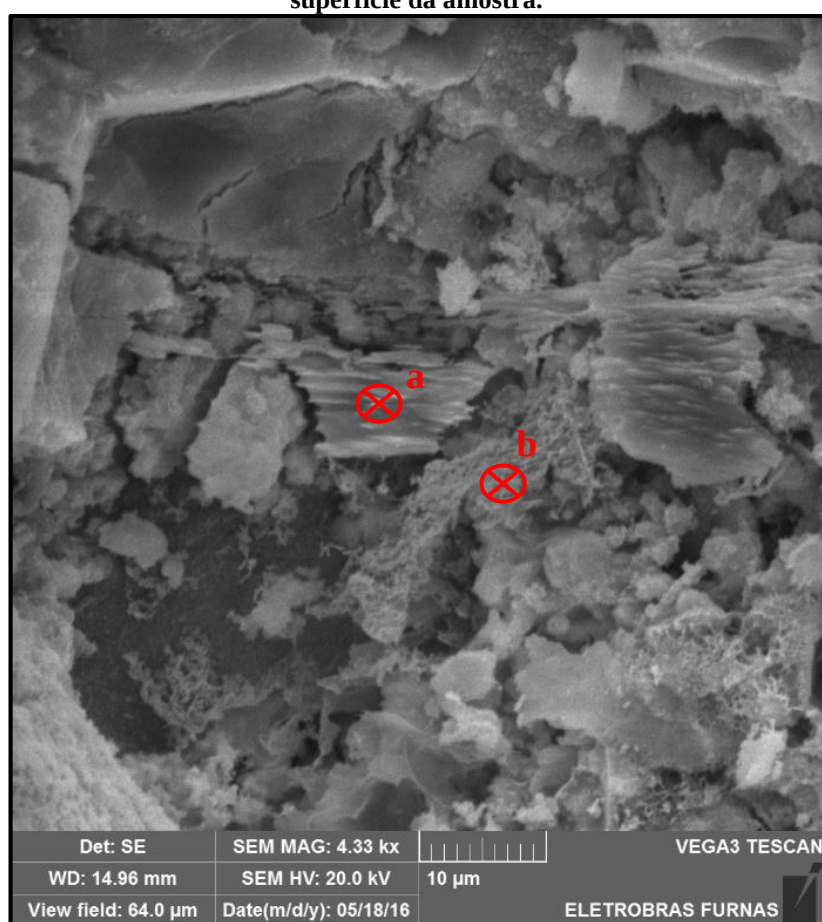
Fonte: a autora.

**Espectro 4 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 6, ponto “b”, demonstrando novamente a formação de sílico-aluminatos de cálcio.**



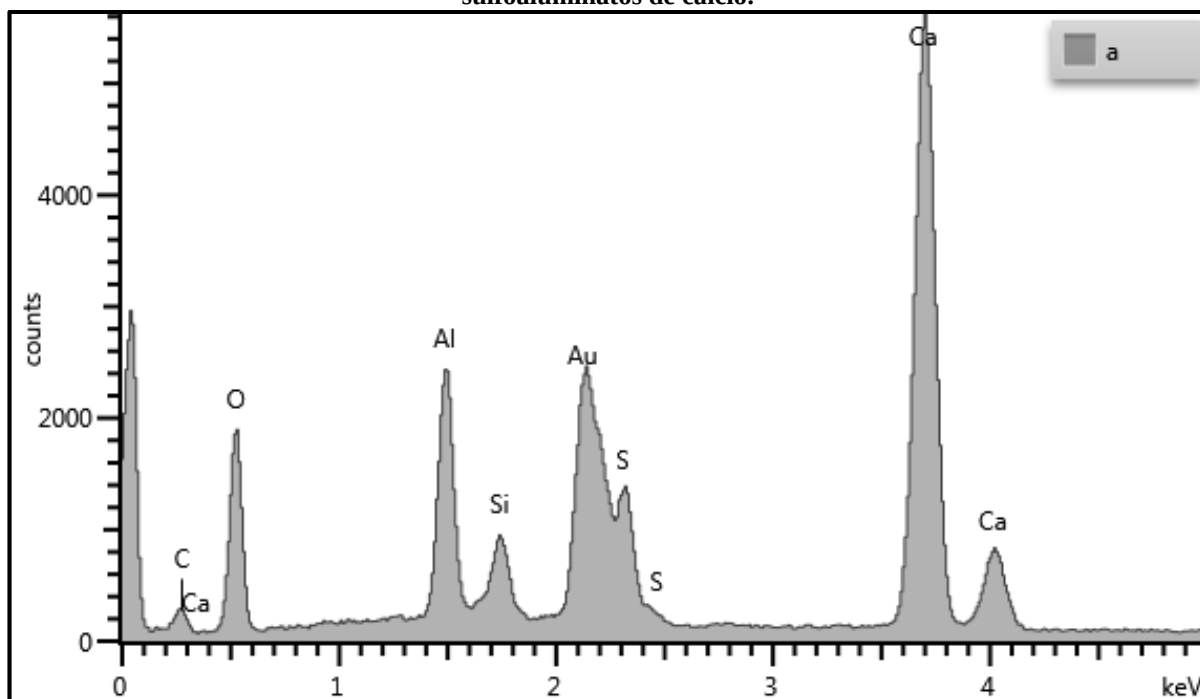
Fonte: a autora.

**Micrografia 7 - Amostra 07 (Topo): vista aproximada de um aglomerado de produtos da pasta na superfície da amostra.**



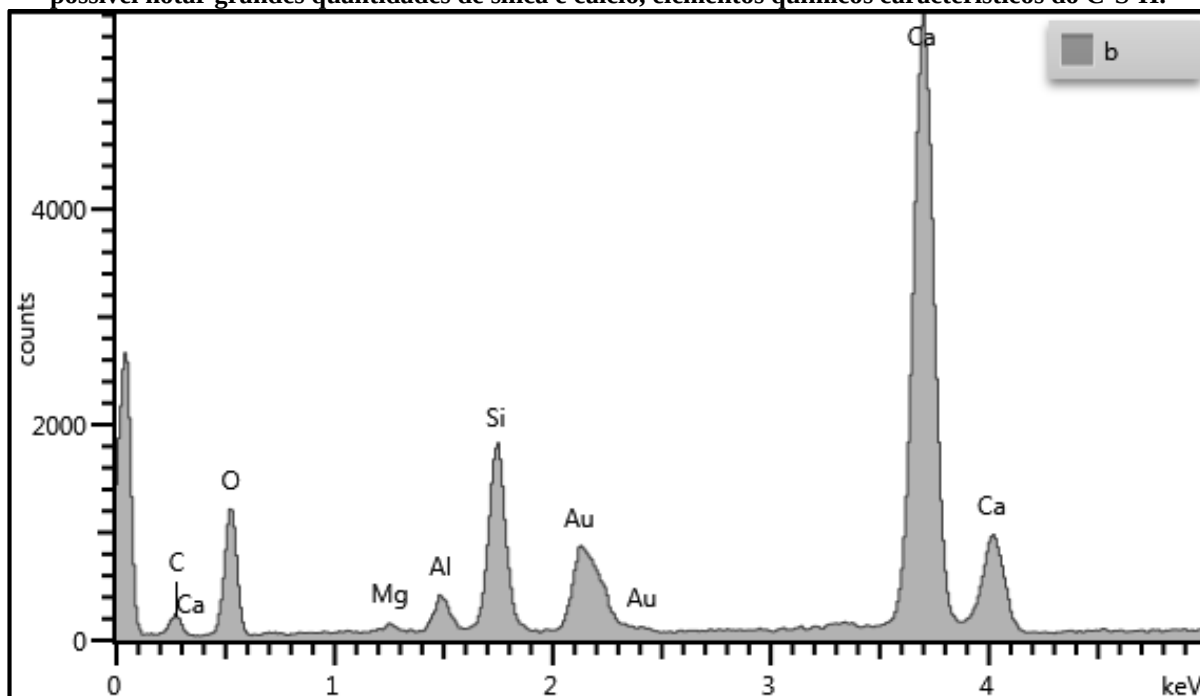
Fonte: a autora.

**Espectro 5 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 7, ponto “a”, destacando taxas elevadas de cálcio, além de alumínio, enxofre e sílica. Indicam a presença de sulfoaluminatos de cálcio.**



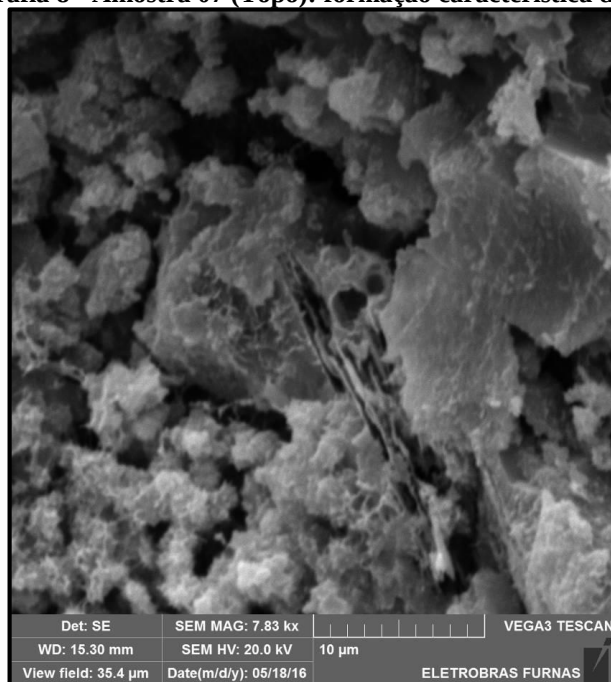
Fonte: a autora.

**Espectro 6 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 7, ponto “b”, sendo possível notar grandes quantidades de sílica e cálcio, elementos químicos característicos do C-S-H.**



Fonte: a autora.

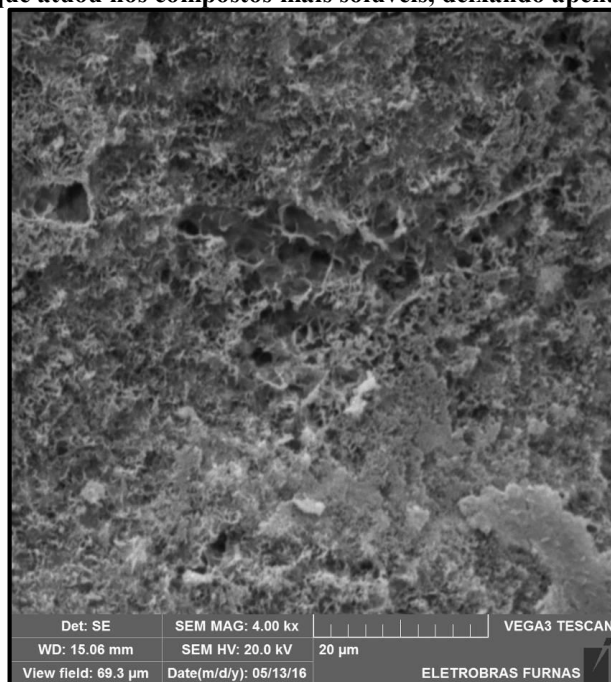
**Micrografia 8 - Amostra 07 (Topo): formação característica de C-S-H.**



**Fonte: a autora.**

Os resultados das amostras da faixa de extração “fundo” estão apresentados a seguir, através das Micrografias 9, 10 e 11, bem como dos correlatos Espectros 7, 8 e 9 para a amostra 03, e das Micrografias 12 e 13 e do Espectro 10 para a amostra 11.

**Micrografia 9 - Amostra 03 (Fundo): C-S-H superficialmente aparente, cuja fácil observação pode estar relacionada à lixiviação que atuou nos compostos mais solúveis, deixando apenas o “esqueleto” de C-S-H.**



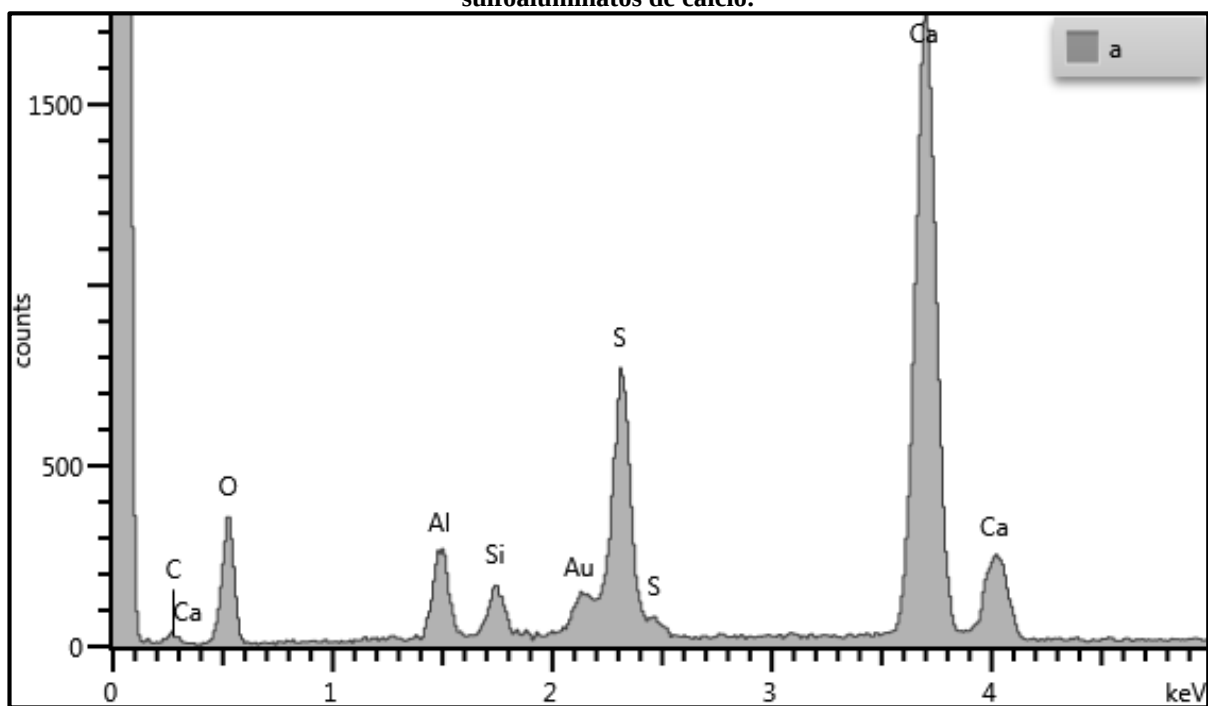
**Fonte: a autora.**

**Micrografia 10 - Amostra 03 (Fundo):** vista aproximada de um produto da pasta na superfície da amostra, pelo formato trata-se provavelmente de uma fase sulfatada (etringita).



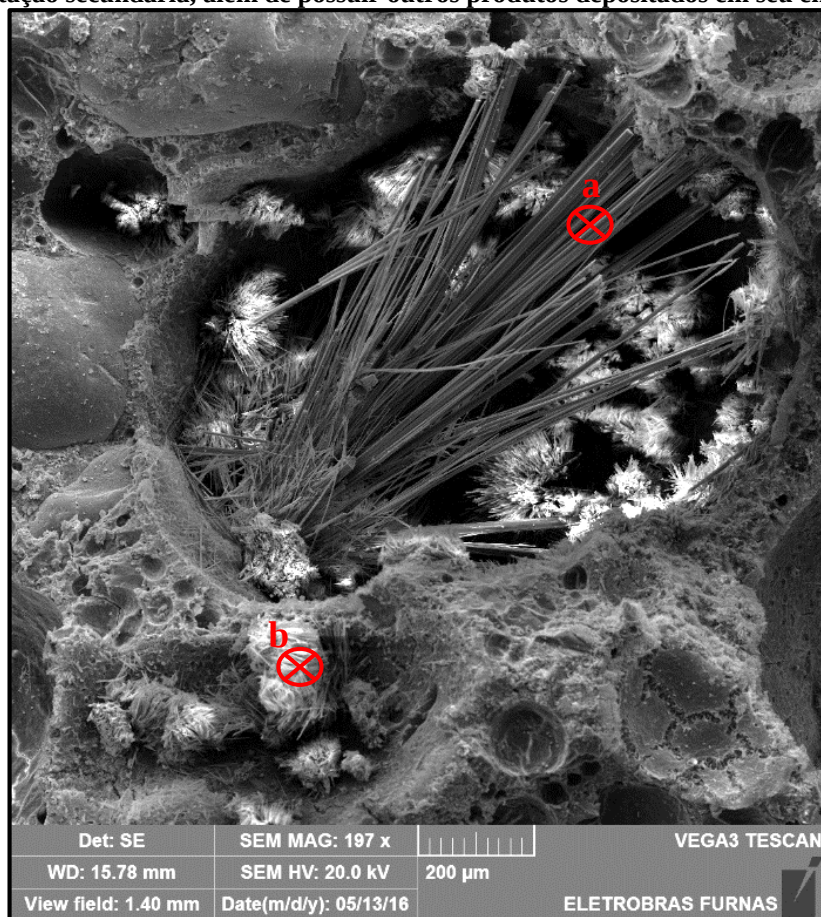
Fonte: a autora.

**Espectro 7 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 10,** demonstrando grandes quantidades de enxofre, cálcio, alumínio e, em menor teor, de sílica. Indicam a presença de sulfoaluminatos de cálcio.



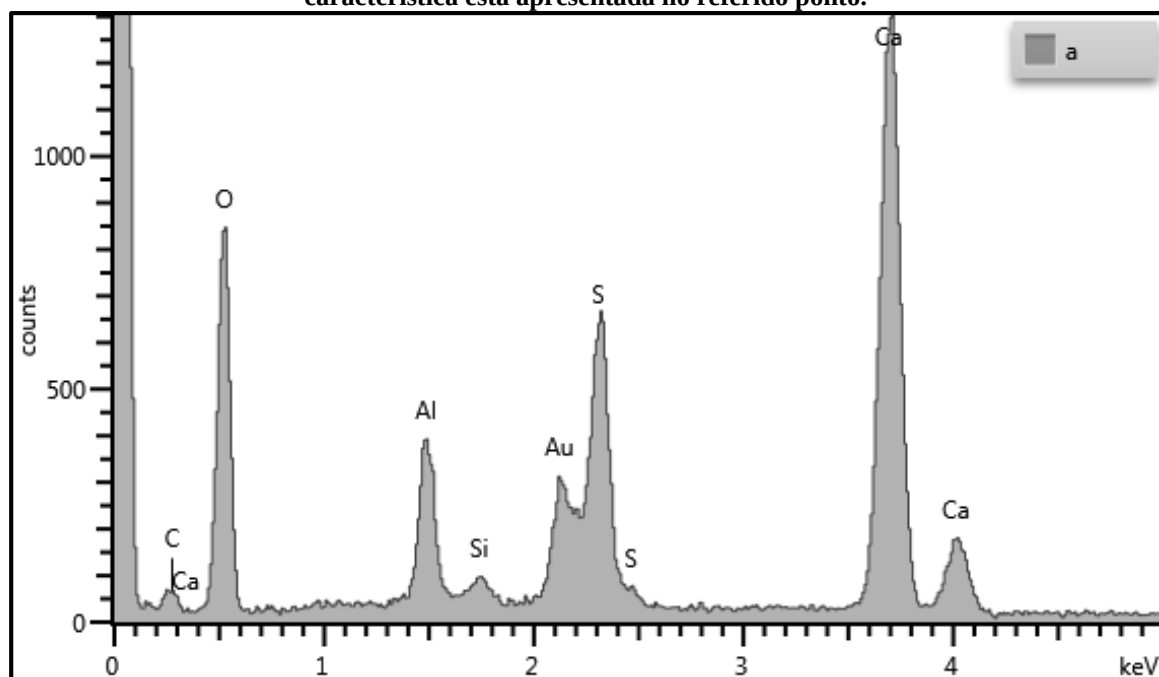
Fonte: a autora.

**Micrografia 11 - Amostra 03 (Fundo):** vista aproximada de um poro preenchido por produtos de hidratação secundária, além de possuir outros produtos depositados em seu entorno.



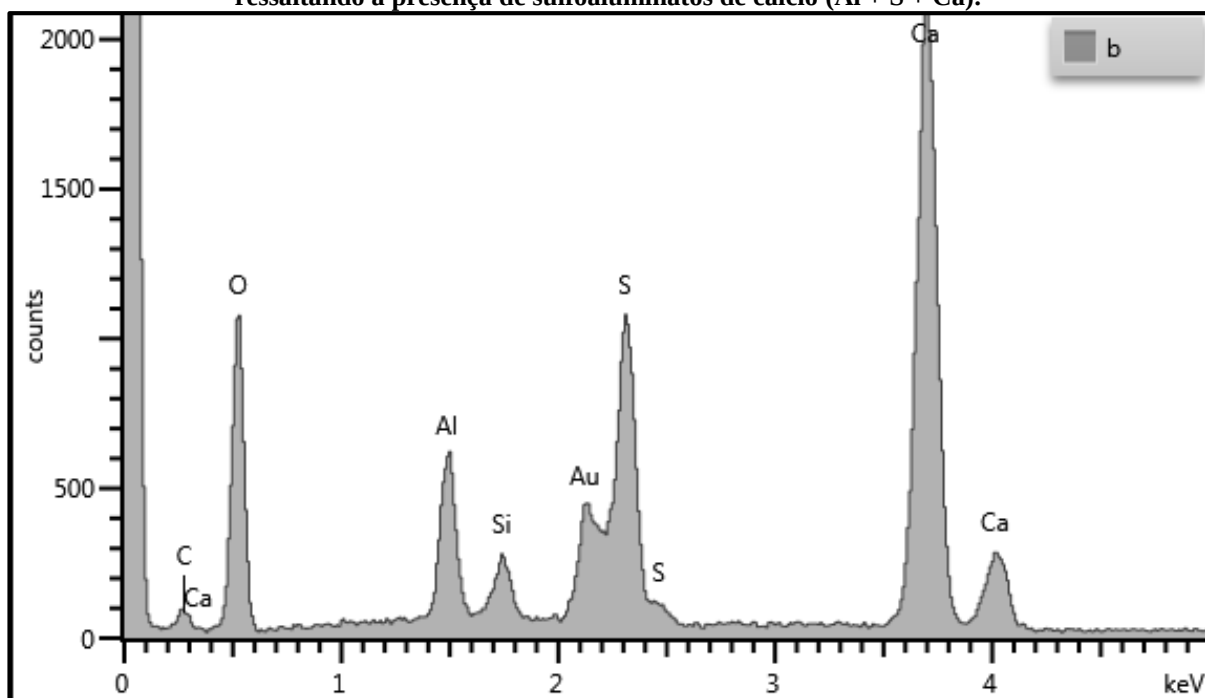
Fonte: a autora.

**Espectro 8 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 11, ponto “a”,** ressaltando a presença de sulfoaluminatos de cálcio, produtos que compõem a etringita, cuja formação característica está apresentada no referido ponto.



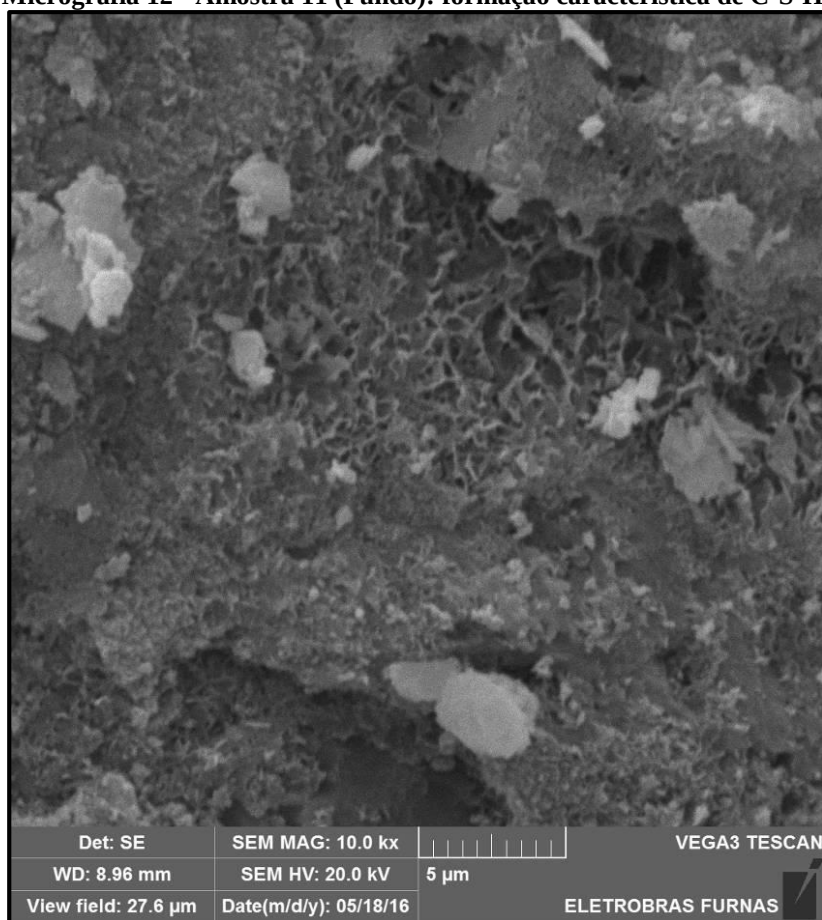
Fonte: a autora.

**Espectro 9 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 11, ponto “b”, ressaltando a presença de sulfoaluminatos de cálcio (Al + S + Ca).**



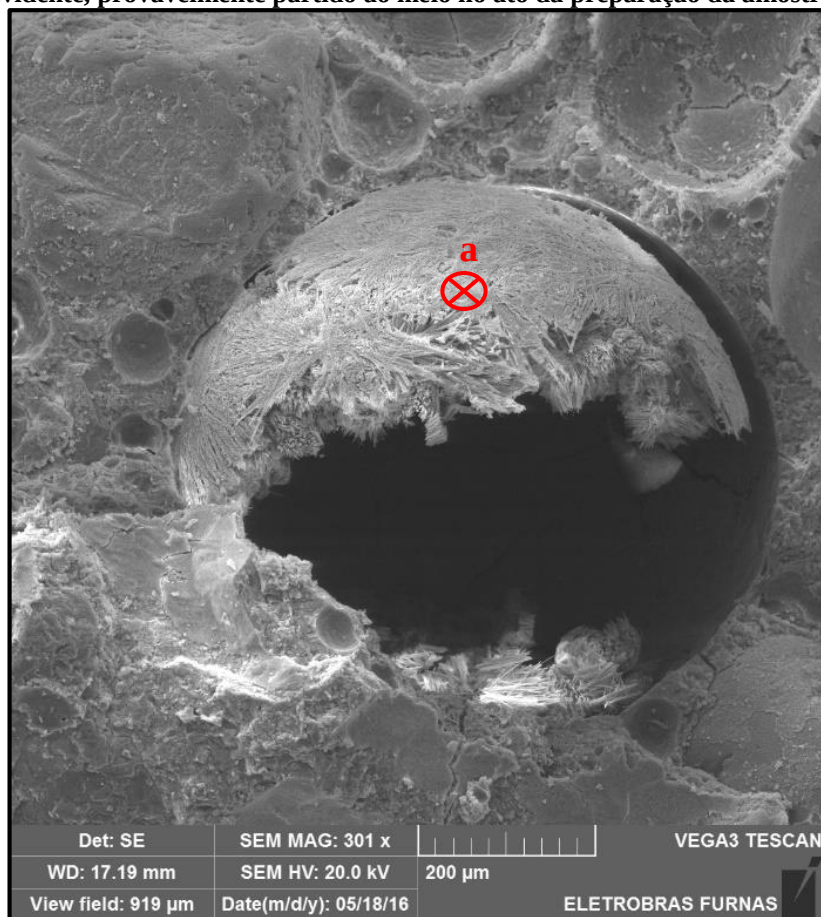
Fonte: a autora.

**Micrografia 12 - Amostra 11 (Fundo): formação característica de C-S-H.**



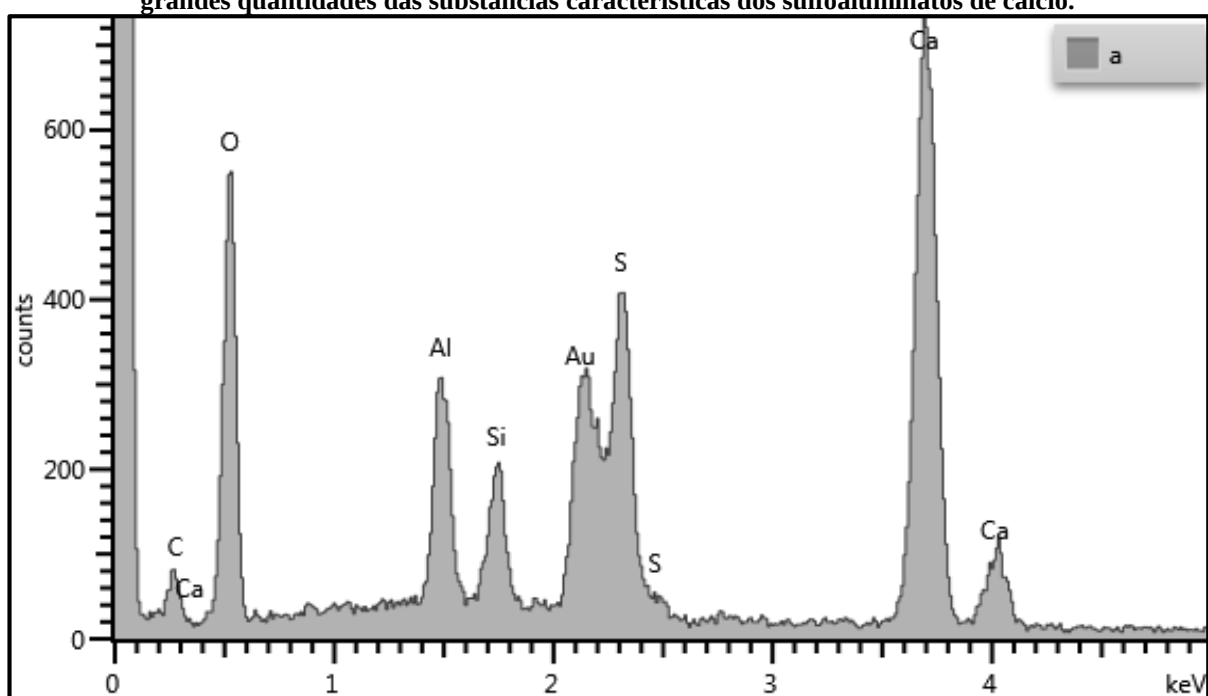
Fonte: a autora.

**Micrografia 13 - Amostra 11 (Fundo): vista aproximada de poro com produto de hidratação secundária evidente, provavelmente partido ao meio no ato da preparação da amostra.**



Fonte: a autora.

**Espectro 10 - Resultado da análise por EDS para a região indicada na Micrografia 13, ressaltando grandes quantidades das substâncias características dos sulfoaluminatos de cálcio.**



Fonte: a autora.

Pela observação e análise dos resultados do MEV e do EDS, tanto para as amostras ensaiadas da faixa “topo” quanto da faixa “fundo”, não foi notada presença de C-H, produto mais solúvel da pasta e comumente o mais afetado pela lixiviação.

Inicialmente, era de interesse da realização desses ensaios utilizá-lo como parâmetro de comparação, comprovando a ocorrência da patologia pela redução dos teores de C-H nas amostras do fundo, propensas a percolação de água, em relação as amostras do topo.

No entanto, como citado, estes produtos não estavam presentes nem nas amostras que representam a região acima do nível máximo operacional do reservatório (cota 74,00 m), nem nas que retratam a zona abaixo dessa. A ausência de C-H nos resultados tem algumas possíveis justificativas, dentre elas:

- a) A idade da estrutura: dentre todas as fases que compõe a pasta de cimento, uma das mais estáveis quimicamente é o C-S-H, tendendo todas as demais a atingir seu estado de equilíbrio. Logo, uma estrutura com mais de trinta anos, como a estudada, já não possuiria tantas fases solúveis (a exemplo o C-H);
- b) Presença de pozolana no traço do concreto analisado: a pozolana é um produto que naturalmente tende a se combinar com o hidróxido de cálcio (C-H), originando silicato de cálcio (C-S-H);
- c) Ocorrência de patologias como lixiviação e carbonatação: conforme explicado anteriormente, essas duas reações estão suscetíveis a consumir, prioritariamente, o C-H, principalmente aquele superficialmente disponível. Portanto, nas amostras extraídas abaixo do nível máximo da água do reservatório, a lixiviação e, até mesmo a carbonatação, podem ter, ao longo dos anos da estrutura, transformado e/ou extraído o C-H presente. No caso das amostras de referência (extraídas acima da cota 74,00 m), apenas a carbonatação pode ter agido nesta retirada de C-H.

Considerando a ausência de C-H nas amostras, demonstrada pela presença nas micrografias apenas de sulfoaluminatos de cálcio e de silicatos de cálcio, pode-se esperar que, atualmente, o que esteja sendo “levado” do concreto pela lixiviação sejam os produtos mais

estáveis, arrancados pela percolação frequente e sob pressão da água através dos poros do concreto.

Notou-se ainda uma maior presença de fases sulfatadas (compostas por enxofre, “S”) nas amostras da faixa “fundo” em relação as amostras da faixa “topo”, provavelmente decorrente da maior presença de umidade nesta região, o que fornece meios mais propícios a hidratação secundária de produtos existentes na pasta, dando origem novamente as fases  $A_{ft}$  (etringita) e  $A_{fm}$  (monossulfato).

É indispensável ressaltar ainda que foram apenas quatro amostras analisadas pelo MEV / EDS, para todo o paramento do Bloco 1-A1 da Eclusa 1, o qual possui aproximadamente 430,00 m<sup>2</sup> de extensão superficial. Logo, estas análises servem apenas de parâmetro inicial para a observação da microestrutura do concreto estudado, nas regiões de interesse (faixas “topo” e “fundo”), evidenciando os produtos que o compõe e possíveis correlações com a ocorrência da patologia pesquisada. Sendo, portanto, incapazes sozinhas de representar uma confirmação do desenvolvimento da lixiviação no referido bloco.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os subcapítulos seguintes apresentam as considerações finais do presente trabalho, incluindo as conclusões permitidas por seu desenvolvimento e pela análise de seus resultados, bem como as sugestões para trabalhos futuros, em linhas semelhantes de pesquisa.

### 6.1 CONCLUSÕES

A princípio, vale ressaltar que as análises químicas da água que sai nos drenos da galeria de drenagem do Bloco 1-A1 permitiram confirmar o esperado, com base na literatura, que era a maior concentração de íons cálcio nas amostras em detrimento das demais substâncias analisadas. Por sua quantidade extraída do concreto ser a mais expressiva, foi com base nela que se realizou a mensuração da perda de massa pelo maciço.

Ao final dos doze meses de pesquisa, fez-se possível alcançar um total de 73,61 kg de íons  $\text{Ca}^{+2}$  lixiviados do concreto, valor obtido através da soma das contribuições dos seis drenos analisados. Dentre eles, o quarto, por sua maior vazão, foi o que mais evidentemente colaborou para a perda de massa. Este valor total representa, com significativa proximidade, o período de junho de 2015 a maio de 2016.

É válido citar que o resultado encontrado poderia ser extrapolado para anos anteriores, conferindo uma noção da quantidade de massa removida do concreto deste 1984. No entanto, considerando que o desenvolvimento da patologia aumenta a porosidade do material e, conseqüentemente, os caminhos para a percolação de água em seu interior, é complicado, por uma análise superficial, estimar a perda de massa ao longo dos anos passados com grande precisão, uma vez que não se tem conhecimento da vazão de saída dos drenos nestes períodos, nem mesmo da provável taxa de aumento desta a cada ano, devido a ocorrência da lixiviação.

Além disto, interessou a este trabalho apenas quantificar a perda de massa em função da extração de íons  $\text{Ca}^{+2}$  do concreto no período de estudo, não propondo, a princípio, um momento máximo para intervenção e recuperação da estrutura. Se este fosse o caso, seria realmente necessário conhecer a quantidade de material extraída até então e o quanto ainda pode ser “carreadi” sem comprometimento estrutural do maciço, mas não é.

Quanto ao ensaio de esclerometria, por ter sido o único que pôde ser realizado tanto no Bloco 1-A1, quanto no 1-C1, permitiu uma breve comparação das resistências superficiais destes blocos. Como citado no decorrer do trabalho, eles são gêmeos, concebidos sob as mesmas condições, porém um apresenta a patologia estudada, o outro não.

Nos resultados da esclerometria o Bloco 1-C1 seguiu uma lógica mais compreensível, sendo os resultados da faixa “topo” superior aos das demais, propensas a ação contínua da água do lago. Já no Bloco 1-A1 a faixa “topo” apresentou a menor resistência em relação as três faixas. Uma provável causa disto é a própria lixiviação que, por ter aumentado a porosidade da zona que fica submersa em grande parte do ano, favoreceu o ataque desta por carbonatação nos meses em que ela fica exposta ao ambiente, fenômeno que provoca aumento da resistência superficial do concreto, mascarando a real resistência em camadas mais profundas do material.

O ensaio de carbonatação, por sua vez, realizado assim que as amostras foram extraídas do paramento, permitiu notar uma linearidade entre a profundidade de carbonatação e a exposição da superfície analisada ao ambiente, conforme se poderia esperar. Ou seja, as maiores profundidades foram notadas na faixa “topo”, seguida das faixas “meio” e “fundo”.

O desgaste superficial, mensurado na sequência do ensaio de carbonatação, apresentou valores homogêneos para toda a superfície analisada abaixo da cota 74 m. Como referido anteriormente na pesquisa, lixiviação e carbonatação são patologias capazes de, com o passar do tempo, ampliar o desgaste da superfície exposta. Uma vez que, na presença de  $\text{CO}_2$  dissolvido na água, o carbonato de cálcio produzido por essas reações se transforma em um produto solúvel, facilmente removido da superfície do concreto, provocando sua erosão gradual.

O ensaio de resistência por compressão axial, diferente dos demais, se mostrou pouco eficaz para a análise do problema, principalmente devido ao tamanho dos testemunhos extraídos, insuficiente se considerado o tamanho dos agregados do concreto analisado. Obteve-se através dele resistências muito baixas, com uma tendência contrária ao esperado. Ou seja, a faixa “topo” apresentou a menor resistência, seguida da faixa “meio” e esta da faixa “fundo”.

No que tange ao ensaio de absorção, este apresentou resultados bastante satisfatórios, tanto para a taxa de absorção, quanto para o índice de vazios das amostras analisadas para cada faixa de extração. Conforme previsto, considerando a ocorrência da lixiviação no bloco onde foram realizadas as extrações, a faixa “fundo” foi a que apresentou as maiores médias destes parâmetros, seguida da faixa “meio” e esta da faixa “topo”. Isto permitiu inferir que há um aumento da porosidade do material ao ampliar a profundidade em análise. Relação decorrente da maior pressão com que a água tende a percolar pelo concreto, considerando o aumento da coluna d’água acima do ponto de infiltração.

Através da análise microestrutural do concreto extraído, observou-se superfícies bastante porosas tanto nas amostras da faixa “topo” quanto nas da faixa “fundo”. No entanto, em sua maioria, trata-se de poros bem delineados, semelhantes aos originados por adição de aditivo incorporador de ar ao concreto, substância utilizada no traço estudado. Além disso, não foram encontrados vestígios de C-H, produto mais solúvel da pasta e comumente afetado pela patologia estudada, em nenhuma das faixas de análise.

A ausência de C-H pode ser justificada pela idade da estrutura, pela presença de pozolana no traço e pela própria ocorrência da lixiviação, ou mesmo da carbonatação, reações capazes de consumi-lo. Ela evidência a grande probabilidade de que atualmente outros produtos de cálcio estão sendo extraídos do concreto, como silicatos e sulfoaluminatos. Na faixa “fundo”, mais que na faixa “topo”, foram notados com frequência produtos de hidratação secundária, provavelmente devido a maior umidade desta região. Não se pode deixar de lembrar que, considerando a amostragem, a análise da microestrutura não seria capaz individualmente de confirmar a patologia, servindo desde o princípio apenas de parâmetro para a observação do problema, sob uma óptica diferenciada.

Entre todos os dados levantados antes da realização dos ensaios, nenhum pareceu justificar o desenvolvimento da lixiviação no Bloco 1-A1 e não no Bloco 1-C1. Uma vez que, tanto em projeto, quanto na descrição dos procedimentos executivos e materiais utilizados ambos são extremamente semelhantes. A partir deste pressuposto, acredita-se que há alguma falha de concretagem, talvez por falta de adensamento, na região permanentemente submersa do Bloco 1-A1 (abaixo da cota 58 m), não tendo sido possível no decorrer desta pesquisa fazer investigações subaquáticas para validar esta hipótese.

Sendo o principal mecanismo da lixiviação a percolação de água através de uma estrutura de concreto, para reduzir o problema basta identificar e vedar os pontos de infiltração. Como afirmado por Santi (2008), infiltrações em estruturas de concreto não são constantes, variando continuamente. Uma maneira de evita-las ou dificulta-las é aumentando a compacidade do concreto.

Usando como exemplo os reparos executados na Barragem do Vossoroca (acometida pela mesma patologia), no estado do Paraná, descritos por Freitas Jr. (2013b), é indicado realizar a impermeabilização do bordo de montante do Bloco 1-A1 da Eclusa 1, por meio da execução de uma cortina de injeções de pasta de cimento com sílica-ativa, espaçadas a uma média de um a quatro metros, além da impermeabilização da superfície do paramento em contato frequente com água, com argamassa de cimento e sílica-ativa acima da linha d'água e com argamassa epóxi abaixo desta.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Abaixo estão elencadas algumas propostas para trabalhos futuros, mantendo-se por tema o estudo da lixiviação do concreto, em especial a análise do caso em desenvolvimento na Eclusa 1. São elas:

- a) Dar prosseguimento as medições de vazão, bem como as coletas e análises de água, sob o intuito de estabelecer uma relação entre os anos, ou seja, verificar uma provável taxa de crescimento anual da vazão, acarretada pelo aumento gradual da porosidade do concreto devido a ocorrência da lixiviação. Em posse desta taxa, realizar a extrapolação da perda de massa para anos anteriores e seguintes;
- b) Modelar computacionalmente a estrutura do muro de ligação do Bloco 1-A1 da Eclusa 1, em 3D, inserindo a condição de percolação interna de água através do concreto, desaguando na galeria de drenagem, e estimar o quanto esta percolação pode estar influenciando na estabilidade do maciço;
- c) Realizar novamente a extração de testemunhos, tanto no Bloco 1-A1, quanto no Bloco 1-C1. No entanto, desta vez com uma broca de dimensões adequadas ao máximo diâmetro do agregado do concreto do paramento, de modo a verificar se,

neste caso, as tendências dos resultados de compressão axial seriam mais coerentes, comparando-as com as fornecidas neste trabalho;

- d) Executar o ensaio de permeabilidade em laboratório, com testemunhos de concreto extraídos do paramento do Bloco 1-A1 da Eclusa 1 ou moldados a partir de uma reconstituição do traço deste, visando relacionar a ocorrência da lixiviação ao aumento da permeabilidade deste;
- e) Investigar de maneira mais aprofundada as causas da ocorrência da patologia no Bloco 1-A1 e não no Bloco 1-C1, através, por exemplo, de uma análise subaquática do concreto, na busca por falhas em potencial que justifiquem a diferença entre os blocos, uma vez que nada muito representativo foi notado nem mesmo acima do nível mínimo da água;
- f) Verificar uma maneira coerente de identificar quando será inevitável uma intervenção à estrutura, ou seja, o prazo máximo para realiza-la, bem como se seria realmente necessária.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 173p. Dissertação.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **ACI 309.5R**: Compaction of roller-compacted concrete. [S.l.], 2000.
- \_\_\_\_\_. **ACI manual of concrete practice** – Part 1. Detroit, 1980. 456 p.
- ANDRADE, W. P. **Procedimento de reparos**. [S.l.], 2010. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7680-1**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10786**: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.
- 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. 715 p.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 415 p.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**: inspeção e técnicas eletroquímicas. 1ª ed. Goiânia: Editora UFG, 1997. 237 p.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. - ELETRONORTE. Acervo fotográfico da empresa. Arquivo morto. Tucuruí, 1983.
- \_\_\_\_\_. Acervo fotográfico da empresa. Arquivo morto. Tucuruí, 1984.

\_\_\_\_\_. Projetos da empresa, fornecidos para consulta. Arquivo morto. Tucuruí, 1982a.

\_\_\_\_\_. **SPC – Controle de qualidade do concreto fabricado**. TUC-40-6258-RE. Tucuruí, 1982b.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT; ELETROBRAS ELETRONORTE. **Normas de tráfego nas eclusas da hidrovía do Tocantins**. 1. ed. [S.l.], 2011.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO – DOU. **VIII – Soluções Indicadoras**. [Brasília], 2006. Seção 1. Nº 239. ISSN 1677-7042.

DUARTE, L. C. *et al.* **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no estudo de gemas: exemplos brasileiros**. Porto Alegre: Instituto de Geociências da UFRGS, 2003. 14 p.

EKSTRÖM, T. **Leaching of concrete**: Experiments and modelling. Lund: Lund University, 2001. Report TVBM-3090. 229 p.

\_\_\_\_\_. **Leaching of concrete**: The leaching process and its effects. Lund: Lund University, [2003]. Report TVBM-1020. 357 p. Doctoral Thesis.

ELETROBRAS ELETRONORTE. Acervo fotográfico da empresa. Tucuruí, 2003.

\_\_\_\_\_. Acervo fotográfico da empresa. Tucuruí, 2010b.

\_\_\_\_\_. **Sistema de transposição do desnível de Tucuruí**: Eclusas de Tucuruí. Apresentação. Tucuruí, 2010a.

\_\_\_\_\_. **Tucuruí**. Disponível em: <http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/aEmpresa/regionais/tucurui/>. Acesso em: 17 fev. 2016.

FREITAS JR., J. A. **A estrutura do concreto**. Material de aula: Materiais de Construção (TC-030). [Curitiba]: UFPR, 2013a. 74 p.

\_\_\_\_\_. **Materiais de construção (TC-031)**: Durabilidade do concreto. Material de aula. [Curitiba]: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2013b.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. **6 – Corrosión de armadura de estructuras de hormigón**: Boletín técnico. Mérida: ALCONPAT Internacional, 2013.

FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com rolo**: ensaios e propriedades. Edição de Pacelli de Andrade. Capítulo 14: Permeabilidade do concreto. São Paulo, 1997.

GERIS ENGENHARIA E SERVIÇOS LTDA. **Eclusas de Tucuruí**: Conheça um pouco deste empreendimento que você ajuda a construir. [Tucuruí]: GERIS, 2008. 4 p. Disponível em: < [http://www.gerisengenharia.com.br/site/arquivo/303-Jornal\\_CIPA-081014-Site.pdf](http://www.gerisengenharia.com.br/site/arquivo/303-Jornal_CIPA-081014-Site.pdf)>. Acesso em: 26 jan. 2016.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 1ª ed. [S.l.]: FEALQ, 2000. 451 p.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 326p. Tese.

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, 2004. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2004. 31p.

JORGE, M. *et al.* Ataque do concreto compactado com rolo por águas puras. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2001, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. 15p.

LAGERBLAD, B. **Leaching performance of concrete based on studies of samples from old concrete constructions**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 2001. Technical Report. TR-01-27. 80 p.

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

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NOGUEIRA, A. A. **Estudo do Processo de Lixiviação do Concreto de Barragens**: Estudo de Caso na Eclusa 1 do Sistema de Transposição da UHE Tucuruí. Tucuruí: UFPA, 2016. 178 p. Dissertação.

OLIVEIRA, T.; NOGUEIRA, A. 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. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES – CBPAT 2016, Belém. **Anais...** Belém: CBPAT, 2016. P. 283-292.

OLIVEIRA, H. M. **Capítulo 3**: Cimento Portland. Materiais de Construção. Coordenador L. A. Falcão Bauer. V. 1. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987a.

\_\_\_\_\_. **Capítulo 10**: Propriedades do Concreto Endurecido. Materiais de Construção. Coordenador L. A. Falcão Bauer. V. 1. 3. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1987b.

PIMENTEL, A. C. N. *et al.* Utilização de concreto rolado na Usina Hidrelétrica de Tucuruí. In: XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1985, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CBDB, 1985. 42 p.

SALES, A. *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado**: Teoria, controle e métodos de análise. Organização de Daniel Vêras 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)**. Curitiba: UFPR, 2008. 103p. Dissertação.

SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado**: Estudo de caso. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 122 p. Monografia.

SCHMIDT. **Concrete test hammer**: Operating instructions (Types L and LR). Zurich: PROCEQ, 1977.

SHIMAKURA, S. E. **Coeficiente de determinação,  $r^2$** . [Curitiba]: UFPR, 2006.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

SZPILMAN, A. *et al.* Avaliação dos efeitos de lixiviação da cal no concreto de enchimento da fundação da casa de força de Itaipu. In: XXI SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBDB, 1994. P. 53-62. 2 v. Tema III.

TAM, C. T. **Constituents and properties of concrete**. The Civil Engineering Handbook. Revisão técnica W.F. Chen e J.Y. Richard Liew. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0958-1.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas**: Monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 179 p. Dissertação.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **EM 1110-2-2006**: Roller-compacted concrete. [S.l.], 2000.