

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Milena Salgado Cardoso dos Santos

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DE CASO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Florianópolis
2022

Milena Salgado Cardoso dos Santos

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DE CASO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pelisser

Florianópolis
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Milena Salgado Cardoso dos

Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado : Estudo de caso de uma estação de tratamento de água / Milena Salgado Cardoso dos Santos ; orientador, Fernando Pelisser, 2022.

111 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, , Programa de Pós-Graduação em , Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. . 2. Durabilidade de estruturas. 3. Patologia das construções. 4. Estação de tratamento de água. I. Pelisser, Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em . III. Título.

Milena Salgado Cardoso dos Santos

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
ESTUDO DE CASO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 05 de dezembro de 2022

Coordenação do Curso

Banca examinadora:

Prof. Dr. Fernando Pelisser
Orientador

Prof.(a) Dr.(a) Fernanda Marchiori
Departamento de Engenharia Civil

José João de Andrade Neto
Engenheiro Civil

Matheus de Cezaro Menegatti
Engenheiro Civil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio e incentivo nestes anos de graduação, sem eles nada disso seria possível. Um agradecimento também aos meus padrinhos, que infelizmente não estão mais presentes para me ver concluir esta etapa, mas que foram essenciais nesse percurso e também na minha formação como pessoa.

Agradeço também meu namorado, pela parceria e compreensão desde que ingressei na universidade, e aos meus amigos da graduação, que me ajudaram nesse caminho e tornaram toda a experiência mais leve.

Agradeço aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina pelos conhecimentos passados durante a graduação, e um agradecimento especial ao meu orientador, o Prof. Dr. Fernando Pelisser, que abraçou minha pesquisa e me deu todo o auxílio que eu precisei para concluir este trabalho.

Por fim, um agradecimento aos meus supervisores de estágio, pelo aprendizado nesse último ano, e por colaborarem para que este trabalho fosse possível.

RESUMO

A falta de manutenção das construções acarreta a sua degradação e redução da vida útil. Neste trabalho foi selecionado como objeto de estudo uma estação de tratamento de água, cuja falta de manutenção no sistema de impermeabilização resultou na infiltração de água nas estruturas de concreto armado e, conseqüentemente, no desenvolvimento de manifestações patológicas. O presente trabalho apresenta análise dessas anomalias, identificando suas causas e correlacionando com possíveis falhas de projeto e execução ou de manutenibilidade da estrutura e seus demais componentes. Para caracterização das manifestações patológicas foram realizadas inspeções visuais, bem como executados ensaios destrutivos e não destrutivos a fim de determinar as propriedades do concreto no estado atual e ambiente no qual está inserido. Através das vistorias e ensaios realizados foi constatada a degradação das estruturas de concreto armado devido a infiltração de água nos elementos estruturais, bem como foi identificada frente de carbonatação nos corpos de prova extraídos, através da qual se efetuou um cálculo de predição da vida útil da estrutura afetada.

Palavras-chave: estrutura de concreto; estação de tratamento de água; patologia das construções; vida útil.

ABSTRACT

The lack of maintenance of constructions leads to their degradation and reduction of service life. In this work, a water treatment plant was selected as the object of study, which the lack of maintenance in the waterproofing system resulted in the infiltration of water in the reinforced concrete structures and, consequently, in the development of pathological manifestations. The present work presents an analysis of these anomalies, identifying their causes and correlating them with possible design and execution failures or lack of maintenance of the structure and its other components. In order to characterize the pathological manifestations, visual inspections were performed, as well as destructive and non-destructive tests were executed in order to determine the properties of the concrete, in its current state and environment in which it is inserted. Through the inspections and tests, it was verified the degradation of the reinforced concrete structures due to the infiltration of water in the structural elements, as well as a carbonation front was identified in the extracted test specimens, through which a calculation was made to predict the service life of the affected structure.

Keywords: concrete structure; water treatment plant; building pathology; service life.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desempenho ao longo do tempo.....	21
Figura 2 - Esquema de ilustração das etapas da corrosão de armaduras em estruturas de concreto.....	25
Figura 3 - Resistência Média a Compressão em função da relação água/cimento e da idade para os cimentos tipo CP 32.....	28
Figura 4 - Retração do concreto em função do consumo de cimento e da relação água/cimento.....	29
Figura 5 - Manchas esbranquiçadas e formação de estalactites devido à lixiviação do concreto.....	30
Figura 6 - Representação esquemática do processo de corrosão eletroquímica presente na armadura de aço de uma estrutura de concreto armado envolvendo as reações de oxidação e redução.....	32
Figura 7 – Fissura devido a corrosão da armadura do concreto.....	33
Figura 8 - Armadura exposta devido ao destacamento do concreto de cobrimento.....	33
Figura 9 - Representação do avanço da frente de carbonatação e destruição da camada passivadora.....	34
Figura 10 – Manchas de umidade/bolor.....	36
Figura 11 - Empolamento e descolamento da pintura.....	36
Figura 12 – Vista superior do objeto de estudo.....	38
Figura 13 – Imagem do decantador e das cortinas de difusão.....	39
Figura 14 – Foto das condições atuais da ETA.....	39
Figura 15 - Imagem geral da ETA.....	40
Figura 16 - Foto das condições atuais da ETA.....	40
Figura 17 - Recorte do projeto arquitetônico, indicando em azul os locais que houve intervenções.....	40
Figura 18 – Recorte do projeto arquitetônico, indicando em azul os locais em que houve intervenções.....	41
Figura 19 - Fluxograma da metodologia de análise da ETA.....	41
Figura 20 - Equipamento utilizado no ensaio de esclerometria.....	43
Figura 21 - Composição do esclerômetro.....	43
Figura 22 - Área de ensaio e pontos de impacto.....	44
Figura 23 - Polimento da superfície com disco de carborundum.....	45
Figura 24 - Execução dos impactos em área de ensaio.....	45
Figura 25 - Ábaco para correlação entre o valor de rebote, resistência superficial do concreto e dispersão.....	46
Figura 26 - Utilização do pacômetro para obtenção da posição das barras de aço.....	47
Figura 27 - Medição do afastamento das barras após mapeamento com pacômetro.....	47
Figura 28 – Medições de armadura após abertura para extração de testemunho. Ressalta-se que existe um pequeno erro na medição, visto que não foi possível realizar a devida limpeza no concreto nas proximidades das barras.....	47
Figura 29 - Extração de testemunho de 75 mm de diâmetro na ocasião da primeira vistoria.....	48
Figura 30 - Realização do rompimento do corpo de prova padrão extraído na 1ª vistoria....	49
Figura 31 - Realização do rompimento de um dos 4 minitestemunhos extraídos.....	49

Figura 32 - Produto utilizado no ensaio.....	50
Figura 33 - Aspersão da solução de fenolftaleína em um dos testemunhos.....	50
Figura 34 - Mudança na coloração do corpo de prova após aspersão do produto.	50
Figura 35 - Medição da frente de carbonatação com paquímetro digital.	50
Figura 36 - Produto utilizado no ensaio.....	51
Figura 37 - Aspersão do nitrato de prata em um dos testemunhos.	51
Figura 38 - Identificação dos módulos da ETA.....	52
Figura 39 - Vistas gerais da canaleta de água bruta.	53
Figura 40 - Vistas gerais da região superior da canaleta de água bruta.....	53
Figura 41 - Aspecto geral da canaleta de água bruta.....	54
Figura 42 - Aspecto geral da impermeabilização da canaleta. Nota-se que esta encontra-se praticamente toda gasta, não conferindo mais estanqueidade à calha.	54
Figura 43 - Manchas esbranquiçadas (depósitos de carbonato de cálcio) devido à lixiviação do concreto.....	55
Figura 44 - Manchas esbranquiçadas (depósitos de carbonato de cálcio) devido à lixiviação do concreto por falhas na impermeabilização da canaleta. Na região foi efetuado reparo com cimento de pega ultrarrápida, porém, este foi insuficiente para impedir as infiltrações	55
Figura 45 - Depósitos de carbonato de cálcio devido à lixiviação do concreto por falhas na impermeabilização da canaleta, permitindo a infiltração de água através de uma fissura presente na estrutura.....	56
Figura 46 - Manchas de umidade e empolamento da pintura na face inferior da canaleta, nos fundos do módulo de tratamento, ocasionados por falhas na impermeabilização do elemento.....	56
Figura 47 - Manchas de umidade e empolamento da pintura na face inferior da canaleta, nos fundos do módulo de tratamento, ocasionados por falhas na impermeabilização do elemento.....	57
Figura 48 - Fissuras de origem higroscópica na lateral da canaleta. Devido à abertura destas fissuras, está ocorrendo também a lixiviação do concreto na região, bem como o empolamento da pintura.	57
Figura 49 - Fissuras de origem higroscópica ocasionadas pela ausência de pingadeira sobre a canaleta, permitindo a retenção de água na superfície.	58
Figura 50 – Fissura de amarração devido à ampliação da canaleta de concreto. Nota-se a ocorrência de infiltrações através da mesma, devido a falhas na impermeabilização da canaleta.....	58
Figura 51 - Fissura característica de processos de corrosão na armadura, ocasionada por falhas na impermeabilização, permitindo a infiltração de água na estrutura.....	59
Figura 52 – Regiões com focos de corrosão da armadura nas quais foram realizados reparos paliativos.....	60
Figura 53 - Vistas gerais das passarelas de concreto.	60
Figura 54 – Exposição e corrosão das armaduras na face inferior das passarelas.	61
Figura 55 - Fissuras ocasionadas por esforços de tração na laje.....	61
Figura 56 – Fissuras ocasionadas por esforços de tração na laje.	61
Figura 57 – Descolamento da impermeabilização na passarela próxima ao filtro.	62
Figura 58 - Vista aérea dos floculadores do módulo principal de tratamento.	62
Figura 59 – Vista geral da região entre o floculador e o decantador.	63

Figura 60 – Vista do fundo e da parede da região entre os floculadores e decantadores. Nota-se a deterioração da impermeabilização, prejudicando a estanqueidade e deixando o concreto sujeito a infiltrações.	63
Figura 61 – Proliferação de limo em excesso devido à falta de manutenção do espaço.	64
Figura 62 – Regiões com focos de corrosão da armadura nas paredes da região entre os floculadores e decantadores.	64
Figura 63 – Fissura de retração agravada pela incidência de água em seu interior, observada na região entre floculadores e decantadores.	65
Figura 64 - Identificação dos módulos de decantador.	66
Figura 65 – Identificação das paredes nos módulos de decantação.	66
Figura 66 - Vista geral do Módulo 1 do decantador.	67
Figura 67 - Vista geral da Parede A. Nota-se a deficiência do sistema de impermeabilização por toda a sua extensão.	68
Figura 68 – Fissura de retração na parede A.	68
Figura 69 – Aproximações da Figura 68, evidenciando fissura.	69
Figura 70 - Fissura de retração na Parede C.	69
Figura 71 - Fissura de retração na Parede C.	70
Figura 72 – Pilar executado de sustentação da cortina de difusão com sinais de abrasão. .	70
Figura 73 – Aspecto do piso com abrasão.	70
Figura 74 – Aspecto da canaleta com erosão acentuada devido a abrasão.	71
Figura 75 - Vista geral do Módulo 2 do decantador.	72
Figura 76 - Aspecto geral da impermeabilização na Parede A. Nota-se a proliferação de microrganismos e a deficiência desse sistema por toda a sua extensão.	72
Figura 77 - Aspecto geral da impermeabilização da Parede D. Nota-se que esta apresenta-se deficiente por toda a extensão da parede.	72
Figura 78 - Aspecto geral da impermeabilização da laje de fundo. Nota-se que esta apresenta-se deficiente por toda a extensão da superfície.	73
Figura 79 – Fissura de 1,8 mm na Parede A.	74
Figura 80 – Vista superior dos filtros da ETA.	74
Figura 81 - Descolamento da membrana impermeabilizante do filtro.	75
Figura 82 – Descolamento da membrana impermeabilizante no interior do filtro.	75
Figura 83 - Vista geral da lateral externa do módulo principal de tratamento.	76
Figura 84 – Locais com infiltrações acentuadas (setas roxas), manchas de umidade (setas vermelhas) na face lateral externa do módulo de tratamento.	77
Figura 85 – Manchas brancas (eflorescências) devido à lixiviação do concreto na região onde foi efetuado reparo com cimento de pega ultrarrápida.	77
Figura 86 – Reparos efetuados em regiões que apresentaram sinais de infiltração.	78
Figura 87 – Aproximações da Figura 86. Infiltrações e manchas esbranquiçadas (eflorescências) devido à lixiviação dos sais solúveis presentes no cimento de pega ultrarrápida utilizado como tratamento paliativo para a corrosão da armadura.	78
Figura 88 – Manchas esbranquiçadas (eflorescências) devido à lixiviação dos sais solúveis presentes no cimento de pega ultrarrápida utilizado como tratamento paliativo para infiltrações.	79
Figura 89 – Tratamento paliativo em área com infiltrações.	79
Figura 90 – Erosão do solo devido à incidência de água no local através de infiltrações na região entre filtros e decantadores e através de tubulações do sistema de drenagem pluvial danificadas.	80

Figura 91 – Manchas de umidade e tentativa de reparação em focos de infiltração na região dos fundos do módulo de tratamento.....	80
Figura 92 – Regiões com infiltrações e reparos paliativos com cimento de pega ultrarrápida.	81
Figura 93 – Manchas de umidade (vermelho) e reparos paliativos efetuados em regiões com infiltrações (amarelo).	81
Figura 94 – Vistas gerais da galeria de tubulações.....	82
Figura 95 – Manchas de umidade e o empolamento e descolamento da pintura por toda a extensão da parede dos fundos do cômodo.	83
Figura 96 – Manchas de umidade e empolamento e descolamento da pintura na parede dos fundos da galeria de tubulações.	83
Figura 97 – Corrosão dos elementos metálicos de suporte às tubulações.....	84
Figura 98 – Corrosão da tubulação metálica.....	84
Figura 99 – Acúmulo de carbonato de cálcio devido a lixiviação do concreto.	85
Figura 100 - Aproximações da Figura 99, evidenciando depósito de carbonato de cálcio....	85
Figura 101 – Fissuras de origem higroscópica.....	86
Figura 102 – Aproximações da Figura 101, evidenciando fissuras.....	86
Figura 103 – Vista geral do depósito.....	87
Figura 104 - Manchas de umidade, proliferação de microrganismos e empolamento e descolamento da pintura por toda a extensão das paredes e teto do depósito.	88
Figura 105 – Manchas de umidade, proliferação de microrganismos e empolamento e descolamento da pintura por toda a extensão das paredes e teto do depósito.	88
Figura 106 – Lixiviação do revestimento argamassado, evidenciado pela presença de estalactites.....	88
Figura 107 – Estalactites devido à lixiviação do concreto (quadro vermelho) e manchas amarronzadas, evidenciando a corrosão das armaduras (quadro amarelo).	89
Figura 108 – Acúmulo de carbonato de cálcio na superfície devido à lixiviação do concreto (seta vermelha), e exposição e corrosão da armadura (seta amarela).	90
Figura 109 - Identificação das paredes dos módulos de decantação.	91
Figura 110 - Indicação da localização dos pontos onde foi efetuado ensaio de esclerometria.	93
Figura 111 - Indicação da localização dos pontos onde foram extraídos os testemunhos. ...	96
Figura 112 – Resultado de ensaio de carbonatação no CP1 indicando concreto sadio (Rosa púrpura), a região carbonatada trata-se de revestimento argamassado.	97
Figura 113 - Resultado de ensaio de carbonatação no CP indicando em sua grande maioria concreto sadio (rosa púrpura), presença de aproximadamente 2,7 cm de frente de carbonatação.....	97
Figura 114 – Aferição da frente de carbonatação. Resultado obtido: 2,7 cm.	97
Figura 115 – Resultado de ensaio de carbonatação no CP3 indicando a presença de um concreto sadio. Ressalta-se que na região incolor foi aplicado o nitrato de prata, por isso a diferença de coloração.....	98
Figura 116 - Resultado de ensaio de carbonatação no CP4 indicando concreto sadio (rosa púrpura).	98
Figura 117 - Resultado de ensaio de íons cloreto no CP 3, indicando concreto sadio (incolor).....	100
Figura 118 - Resultado de ensaio de íons cloreto no CP 4, indicando concreto sadio (incolor).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de agressividade ambiental (CAA).....	23
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o revestimento nominal para $\Delta c = 10$ mm	24
Tabela 3 - Valores medidos do rebote R nas paredes ensaiadas (1/2).....	93
Tabela 4 - Valores medidos do rebote R nas paredes ensaiadas (2/2).....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resultado obtido pela pacometria nas paredes de concreto dos módulos de decantação.....	92
Quadro 2 - Coeficientes de forma dados pelo fabricante.	94
Quadro 3 – Resultados obtidos pelo Ábaco do fabricante, e pelas correções recomendadas pela NBR 7584:2012.....	95
Quadro 4 – Resultados da resistência à compressão dos testemunhos de concreto.	96
Quadro 5 - Correção do fck estimado do concreto no ensaio de esclerometria devido a influência da carbonatação.	100

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAA - Classe de Agressividade Ambiental

COBREAP - Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias

ETA – Estaao de Tratamento de gua

SINDUSCON - PA - Sindicato da Indústria da Construção do Estado do Pará

VUP - Vida útil de Projeto

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	JUSTIFICATIVA	17
3.	OBJETIVOS	18
3.1.	OBJETIVOS GERAIS	18
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3.3.	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	18
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	19
4.1.	PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES	19
4.2.	DURABILIDADE E VIDA ÚTIL.....	20
4.2.1.	Manutenção	20
4.2.2.	Agressividade do ambiente	22
4.2.3.	Estimativa de vida útil	24
4.2.4.	Vida útil de sistemas de impermeabilização	25
4.3.	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	26
4.3.1.	Fissuras	26
4.3.1.1.	<i>Fissuras causadas por movimentações higroscópicas</i>	27
4.3.1.2.	<i>Fissuras causadas pela retração de produtos à base de cimento</i>	27
4.3.2.	Erosão do concreto	29
4.3.3.	Lixiviação	30
4.3.4.	Corrosão da armadura	31
4.3.4.1.	<i>Camada passivadora</i>	32
4.3.4.2.	<i>Identificação da manifestação patológica</i>	33
4.3.5.	Processo de carbonatação	33
4.3.6.	Ataque por cloretos	35
4.3.7.	Manchas de umidade/bolor	35
4.3.8.	Empolamento/descolamento da pintura	36
4.4.	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)	37
5.	METODOLOGIA	38
5.1.	OBJETO DE ESTUDO	38
5.1.1.	Histórico	39
5.2.	DIAGNÓSTICO E CARACTERIZAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS 41	
5.2.1.	Inspeção visual	42

5.2.2.	Inspeção das propriedades do concreto	42
5.2.2.1.	<i>Esclerometria.....</i>	42
5.2.2.1.1.	Resultados	45
5.2.2.2.	<i>Mapeamento das armaduras.....</i>	46
5.2.2.3.	<i>Determinação da resistência à compressão através de testemunhos.....</i>	48
5.2.2.4.	<i>Ensaio de carbonatação</i>	49
5.2.2.1.	<i>Ensaio de determinação da presença de íons-cloreto</i>	50
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
6.1.	DANOS E INCONFORMIDADES	52
6.1.1.	Canaletas de água bruta	53
6.1.1.	Passarelas.....	60
6.1.2.	Floculador	62
6.1.3.	Decantador.....	65
6.1.3.1.	<i>Módulo 1.....</i>	67
6.1.3.2.	<i>Módulo 2.....</i>	71
6.1.4.	Filtro	74
6.1.5.	Área externa.....	76
6.1.6.	Outros ambientes	82
6.1.6.1.	<i>Galeria das tubulações</i>	82
6.1.6.2.	<i>Depósito</i>	87
6.1.6.3.	<i>Caixão perdido</i>	89
6.2.	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA	91
6.2.1.	Mapeamento das armaduras (pacometria)	91
6.2.2.	Ensaio de esclerometria.....	92
6.2.1.	Determinação da resistência utilizando testemunhos	95
6.2.2.	Ensaio de carbonatação.....	96
6.2.2.1.	<i>Predição de vida útil</i>	98
6.2.2.2.	<i>Correções do ensaio de esclerometria devido à carbonatação.....</i>	99
6.2.3.	Ensaio de determinação da presença de íons cloreto.....	100
6.3.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
6.4.	RECOMENDAÇÕES	103
7.	CONCLUSÃO	105
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
	ANEXO A – PROJETOS ARQUITETÔNICOS DA ETA	110

1. INTRODUÇÃO

A norma NBR 6118:2014 determina nas suas premissas de cálculo uma vida útil de projeto (VUP) para estruturas de concreto armado de 50 anos, desde que atendidas as condições de manutenção descritas na NBR 5674:2012. Porém, torna-se inviável a demolição das edificações após atingirem 50 anos de vida para a construção de novas. Esta prática seria não somente onerosa, mas também resultaria na geração de grandes quantidades de entulho, bem como aumentaria a produção de poluição em um planeta no qual a temática da sustentabilidade vem se tornando cada vez mais importante e necessária.

Apesar de todos os cuidados com os serviços de manutenção, as construções mais antigas virão a desenvolver manifestações patológicas devido à sua avançada idade, tanto nas estruturas de concreto armado como nos demais sistemas. Devido a este motivo, surgiu o segmento de Patologia das Construções na engenharia civil, que estuda as manifestações patológicas que podem vir a acometer as edificações, diagnosticando-as e podendo assim se obter a prescrição de terapias adequadas para sua recuperação, prolongando a sua vida útil e aumentando a sua durabilidade.

Segundo Souza e Ripper (1998), a vida útil e a durabilidade das construções são conceitos conexos. Uma vez que conhecidos os mecanismos de degradação do ambiente, tem-se a durabilidade como um parâmetro que os relaciona com as construções. Estima-se então os tipos de resposta que estes efeitos da agressividade ambiental terão na estrutura, e a partir destes conceitos define-se a vida útil da mesma.

No decorrer deste trabalho será feita a análise de uma estação de tratamento de água cuja estrutura se apresenta em processo avançado de deterioração, relacionando estas inconformidades com falhas de execução/projeto, bem como com a falta de processos de manutenção ou com sua periodicidade inadequada, o que ocasiona a diminuição significativa de sua vida útil.

2. JUSTIFICATIVA

As obras de infraestrutura pública são de suma importância para o bom funcionamento da sociedade como um todo. Dessa forma, a interrupção de serviços essenciais devido a problemas na estrutura das construções pode gerar grande inconveniente para a população local.

Além disso, esse tipo obra costuma requerer grandes investimentos financeiros por parte das concessionárias ou entidades governamentais, logo, possíveis perdas nas estruturas não geram apenas incômodos, mas também grandes prejuízos. Desta forma, se faz necessário se estender ao máximo a vida útil destas construções.

A manutenção dos sistemas e subsistemas da edificação ao longo do seu tempo de uso é de suma importância em qualquer tipo de construção, mas requerem cuidados ainda mais especiais em obras de infraestrutura pública. Nas estações de tratamento de água (ETAs), por exemplo, as estruturas podem desenvolver manifestações patológicas mais facilmente, devido a agressividade do ambiente e dos elementos químicos utilizados no tratamento da água. Além disso, as estruturas dos reservatórios costumam ser robustas, portanto, caso não haja manutenções adequadas e os elementos estruturais venham a ser deteriorados, os custos para recuperação podem ser altíssimos, e o abastecimento de água de toda uma região pode ser interrompido, afetando gravemente os municípios já que se trata de um recurso essencial à vida humana.

Caso sejam necessárias manutenções corretivas nestas estruturas, é essencial que sejam efetuados estudos para obtenção de diagnósticos precisos das manifestações patológicas, bem como um planejamento adequado para recuperação, minimizando interrupções no serviço de abastecimento.

Este estudo de caso visa identificar manifestações patológicas em uma ETA, determinando suas origens e recomendando intervenções necessárias para recuperação e manutenção, evitando reincidência das anomalias.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo diagnosticar as manifestações patológicas presentes nas estruturas de concreto armado de uma estação de tratamento de água, identificando seus agentes causadores e determinando sua vida útil.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Diagnóstico das manifestações patológicas da ETA;
- b) Estimativa da vida útil da estrutura, considerando o avanço da frente de carbonatação;
- c) Proposição de recomendações técnicas para recuperação da estrutura.

3.3. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este trabalho se limitou ao diagnóstico e caracterização das manifestações patológicas encontradas na ETA, não sendo efetuados cálculos para determinação da segurança estrutural da construção, ou análises orçamentárias para as recuperações propostas.

Ademais, devido à impossibilidade de a concessionária efetuar o esvaziamento dos módulos de floculação e dos filtros, o estudo limitou-se à avaliação das áreas externas destes elementos, sendo os únicos módulos analisados internamente os de decantação.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

Com a necessidade de se estender a durabilidade das construções, garantindo sua segurança e evitando grandes prejuízos financeiros ou ambientais, veio também a expansão dos estudos acerca dos mecanismos de degradação das estruturas, bem como dos seus processos de recuperação. Desse modo, surge o campo de patologia das construções.

Souza e Ripper (1998) definem patologia das estruturas como um novo campo da engenharia das construções que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Paulo Helene (1992) complementa ainda o campo de patologia das construções como o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema. Basicamente, consiste no estudo de manifestações patológicas nas construções.

A NBR 15575-1 define como manifestação patológica uma irregularidade que se manifesta no produto em função de falhas no projeto, na fabricação, na instalação, na execução, na montagem, no uso ou na manutenção, bem como problemas que não decorram do envelhecimento natural (ABNT, 2021).

A inspeção das construções compreende as etapas de anamnese, onde se obtém o histórico de antecedentes e o levantamento de dados acerca da construção, o diagnóstico, que se é obtido através de exame visual e ensaios, e o prognóstico, que consiste na prescrição dos tratamentos e ações de intervenção (SALDANHA, 2015).

O conhecimento acerca das manifestações patológicas das construções não somente é utilizado para recuperação das estruturas, mas também é um forte aliado nas etapas de concepção de projeto e de execução. Conhecendo os possíveis vícios construtivos que possam vir a se desenvolver é possível planejar a construção de modo a evitá-los, reduzindo também possíveis gastos futuros com manutenções corretivas.

4.2. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

Os conceitos de durabilidade e vida útil caminham juntos, sendo muito difícil tratá-los separadamente. A NBR 15575-1:2021 define durabilidade como o período pelo qual um produto mantém suas características de funcionalidade, ou seja, a durabilidade se extingue quando o produto deixa de atender às funções que lhe forem atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional. Já a vida útil é uma medida temporal da durabilidade de um edifício ou de suas partes, e compreende o período de tempo entre o início de operação ou uso de um produto e o momento em que o seu desempenho deixa de atender aos requisitos do usuário preestabelecidos (ABNT, 2021).

Tratando das estruturas de concreto, a NBR 6118:2014 define durabilidade como a capacidade da estrutura em resistir às influências previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração de projetos (ABNT, 2014). Ou seja, as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas, e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, sua estabilidade e sua aptidão em serviço durante o período que corresponde à sua vida útil, estabelecida pelo contratante (SALES et al., 2018).

A NBR 15575-1:2021 define também a vida útil de projeto (VUP), que é estabelecida pelo incorporador e/ou proprietário e o projetista e expressa previamente, sendo, resumidamente, uma expressão de caráter econômico de um requisito do usuário. Há atualmente valores de VUP considerados satisfatórios para cada parte das edificações, sendo estes valores atingidos através de anos de pesquisas de opinião entre técnicos, usuários e agentes envolvidos com os processos de construção (ABNT, 2021).

4.2.1. Manutenção

Para que uma estrutura possa atingir a vida útil para qual foi definida em projeto, é imprescindível ainda que esta receba manutenções adequadas. A NBR 5674:2012 define os serviços de manutenção como intervenções realizadas nas

edificações e seus sistemas, elementos ou componentes constituintes (ABNT, 2012). Os serviços de manutenção podem ainda ser preventivos, rotineiros ou corretivos.

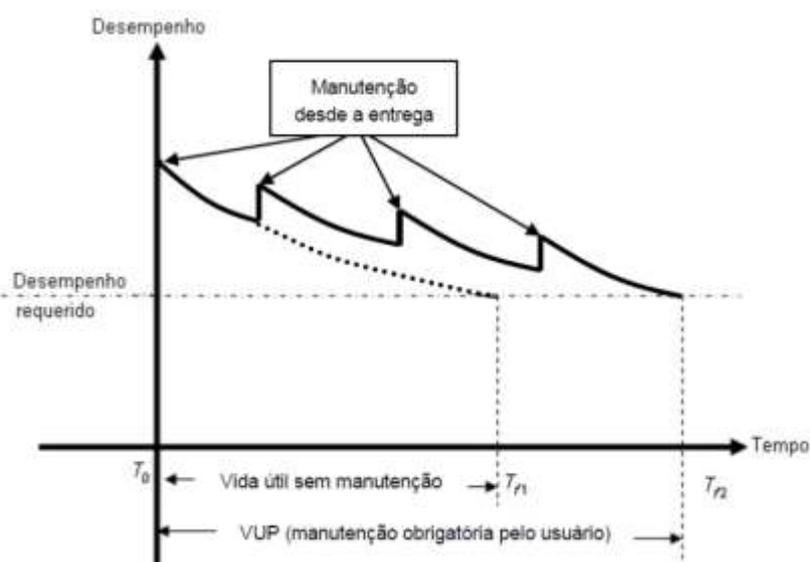
Entende-se por manutenção preventiva aquela efetuada em intervalos predeterminados, conforme critérios prescritos. É realizada para manter o equipamento ou instalação em condições satisfatórias de operação, destinando-se a reduzir a possibilidade de falha ou degradação natural do desempenho do componente, bem como prevenir contra ocorrências adversas (SINDUSCON-PA, 2010).

A manutenção rotineira é efetuada juntamente com os cuidados de uso e realizada pelo próprio usuário durante a utilização do produto e visa manter o equipamento ou instalação em condições satisfatórias de operação, reduzindo a possibilidade de falha ou degradação natural do desempenho do componente, bem como prevenir contra ocorrências adversas (SINDUSCON-PA, 2010).

Já a manutenção corretiva é aquela efetuada após a ocorrência de uma falha, com o intuito de corrigir as causas e efeitos de ocorrências constatadas, destinando-se a recolocar o componente em condições de executar sua função requerida (SINDUSCON-PA, 2010).

A NBR 15575-1:2021 explicita que a vida útil de uma estrutura pode ser prolongada através de ações de manutenção, conforme ilustra a figura a seguir.

Figura 1 - Desempenho ao longo do tempo.



Fonte: ABNT NBR 15575-1:2021.

Quem define a VUP deve também estabelecer as ações de manutenção que devem ser realizadas para garantir o atendimento a ela. É necessário salientar a importância da realização integral das ações de manutenção pelo usuário, para que não haja o risco de a VUP não ser atingida (ABNT, 2021).

Apesar da sua importância, mesmo se realizando a manutenção adequada dos elementos construtivos e seus componentes, a sua deterioração pode vir a acontecer. Os limites de desempenho e qualidade são diferentes para cada construção, e o ponto limite no qual estes passam a não mais ser considerados satisfatórios varia também. Algumas construções, por falhas nas etapas de projeto ou de execução, já iniciam as suas vidas de forma insatisfatória, enquanto outras chegam ao final de suas vidas úteis projetadas ainda mostrando um bom desempenho. (SOUZA E RIPPER, 1998).

Assim, a patologia das construções entra como uma aliada no processo de conservação das estruturas, uma vez que com o conhecimento acerca das manifestações patológicas e suas causas é possível prescrever as manutenções corretivas necessárias para que a edificação volte a apresentar desempenho satisfatório.

4.2.2. Agressividade do ambiente

Outro fator que pode afetar a durabilidade e a vida útil das estruturas é a agressividade do meio ao qual estão inseridas.

A agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas. Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na tabela abaixo e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes. (ABNT, 2014).

Tabela 1 - Classe de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^{a, b}	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito Forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2014

A classificação da agressividade do ambiente, com base nas condições de exposição da estrutura ou suas partes, deve levar em conta o micro e macroclima atuantes sobre a obra e suas partes críticas (ANDRADE, 2005).

A NBR 6118:2014 também explicita que a classe de agressividade é definida pelo responsável pelo projeto estrutural, que vai adequar seu caso às classes apresentadas na tabela, mas que também pode optar por considerar classificação mais agressiva que a estabelecida na tabela acima.

A classe de agressividade do ambiente pode ser utilizada para se obter o cobrimento mínimo para as estruturas de concreto armado, característica que está diretamente relacionada com a sua durabilidade. Os valores de cobrimento em função da CAA são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c **Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.**

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

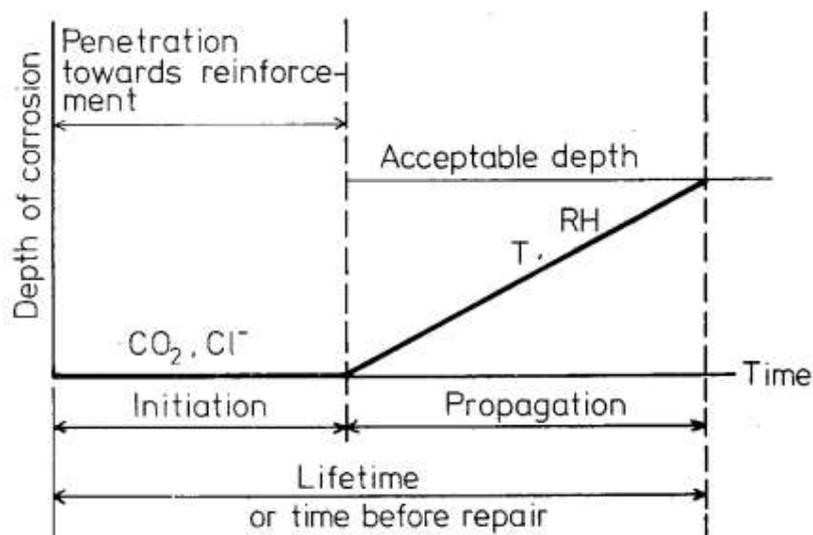
Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2014

Conforme destacado na tabela acima, estruturas de reservatórios e estações de tratamento de água são consideradas superfícies expostas a ambientes agressivos, portanto sua CCA deve ser definida como IV, cujos cobrimentos nominais mínimos devem ser de 45 mm para lajes, 50 mm para vigas e pilares, e 50 mm para elementos estruturais em contato com o solo.

4.2.3. Estimativa de vida útil

A partir de modelos matemáticos é possível se obter uma estimativa de vida útil para as estruturas de concreto. TUUTTI (1982) propôs um modelo simplificado que determina que a vida útil de uma estrutura, sob o ponto de vista da corrosão de armaduras, se divide no período de iniciação e no período de propagação, conforme ilustra a figura a seguir.

Figura 2 - Esquema de ilustração das etapas da corrosão de armaduras em estruturas de concreto.



Fonte: Adaptado de TUUTTI, 1982

O período de iniciação é determinado pelo quão rápido os agentes agressivos conseguem chegar até a armadura, enquanto o período de propagação se inicia juntamente com o início da corrosão da armadura, até que esta manifestação patológica ultrapasse os limites aceitáveis (TUUTTI, 1982).

O modelo matemático de predição de vida útil proposto por TUUTTI leva em consideração o avanço da frente de carbonatação no concreto e é expresso pela fórmula $X = k\sqrt{t}$, onde X é a profundidade de carbonatação em mm, t é o tempo de exposição em anos, e k é um coeficiente de carbonatação, dado em $\text{mm/ano}^{1/2}$.

4.2.4. Vida útil de sistemas de impermeabilização

De acordo com a NBR 9575:2010, a impermeabilização deve ser projetada de modo a:

- a) evitar a passagem de fluidos e vapores nas construções, pelas partes que requeiram estanqueidade;
- b) proteger os elementos e componentes construtivos que estejam expostos ao intemperismo contra a ação de agentes agressivos presentes na atmosfera;
- c) proteger o meio ambiente de agentes contaminantes;
- d) possibilitar sempre que possível acesso à impermeabilização, com o mínimo de intervenção nos revestimentos sobrepostos a ela.

Além disso, os sistemas de impermeabilização a serem adotados devem resistir às cargas atuantes sob e sobre a impermeabilização, aos efeitos dos movimentos do substrato e revestimentos ocasionados por variações térmicas, resistir à degradação ocasionada por influências climáticas, térmicas, químicas ou biológicas (como o desgaste ocasionado pela abrasão), resistir às pressões hidrostáticas, e apresentar aderência, flexibilidade, resistência e estabilidade físico-mecânica compatíveis com as solicitações previstas nos demais projetos (NBR 9575:2010).

O tipo adequado de impermeabilização a ser empregado deve ser determinado segundo a solicitação imposta pelo fluido nas partes construtivas que requeiram estanqueidade (NBR 9575:2010), e ainda de acordo com peculiaridades do projeto, no caso de ETAs, o sistema de impermeabilização escolhido deve ser tal que não ocasione a contaminação da água tratada.

A NBR 15575-1:2021 explicita os valores de vida útil de projeto mínimas para os sistemas de impermeabilização. Para os módulos de tratamento de uma ETA, onde a impermeabilização é manutenível sem quebra de revestimentos, sua VUP mínima deve ser de 8 anos, ou seja, durante este período deve ser garantido o bom funcionamento deste sistema, desde que efetuadas manutenções adequadamente.

A NBR 5674:2012 explicita que a cada 1 ano deve-se verificar a integridade do sistema de impermeabilização e reconstituir a sua proteção mecânica quando houver, bem como deve-se buscar sinais de infiltração ou falhas da impermeabilização exposta para efetuar eventuais reparos necessários.

Efetuando as manutenções adequadas tem-se garantido o bom funcionamento da impermeabilização, porém, após atingida sua VUP, este sistema deve ser executado novamente, evitando falhas na estanqueidade que possam vir a deteriorar os demais sistemas da construção.

4.3. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

4.3.1. Fissuras

Entre os inúmeros problemas patológicos que afetam as construções, um particularmente importante são as fissuras, devido a três aspectos fundamentais: o aviso de um eventual estado perigoso para a estrutura, o comprometimento da obra

em serviço (estanqueidade, durabilidade etc.) e o constrangimento psicológico que a fissuração exerce sobre os usuários (THOMAZ, 2020)

Há diversos tipos de fissuras que podem acometer as estruturas de concreto armado, cada uma desencadeada por diferentes fatores, dependentes das condições do meio nas quais estão inseridas, das suas condições de manutenção ou até oriundas de falhas no seu processo executivo.

4.3.1.1. Fissuras causadas por movimentações higroscópicas

As mudanças higroscópicas provocam variações dimensionais nos materiais porosos que integram os elementos e componentes da construção. O aumento do teor de umidade ocasiona a expansão do material, enquanto a diminuição desse teor resulta na sua contração. Caso existam vínculos que impeçam ou restrinjam essas movimentações, poderão ocorrer fissuras nos elementos do sistema construtivo (THOMAZ, 2020).

A umidade pode ter acesso aos materiais no seu processo de fabricação ou na execução da construção, ou ainda pode ser proveniente do ar, solo ou dos fenômenos meteorológicos.

4.3.1.2. Fissuras causadas pela retração de produtos à base de cimento

A hidratação do cimento consiste na transformação dos compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados praticamente insolúveis, havendo nesta fase a formação de uma camada de gel em torno dos grãos dos compostos anidros (THOMAZ, 2020). De acordo com Helene (1992), para que ocorra a reação química completa (estequiométrica) entre a água e os compostos anidros, bem como a constituição do gel, uma relação água/cimento de cerca de 0,40 é suficiente.

De modo a melhorar a trabalhabilidade dos concretos e argamassas, muitas vezes estes são preparados com água excessiva, acentuando a sua retração, que pode ser:

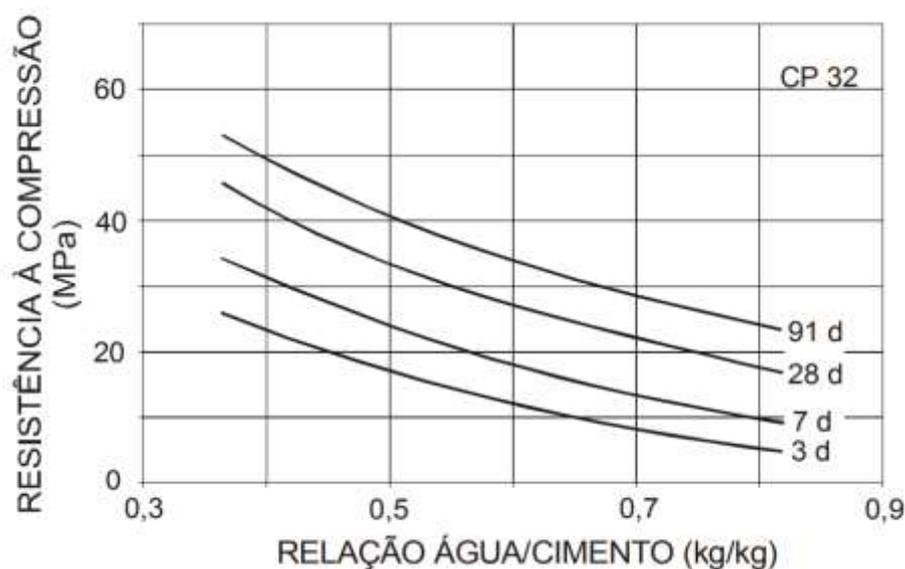
- a) Química ou autógena, na qual a reação química entre o cimento e a água se dá com redução de volume; (THOMAZ, 2020)
- b) Retração de secagem, na qual a água excedente permanece livre no interior da massa, evaporando-se posteriormente; (THOMAZ, 2020)

- c) Retração por carbonatação, na qual a cal hidratada liberada nas reações de hidratação do cimento reage com o gás carbônico presente no ar, formando carbonato de cálcio e água livre, que ao evaporar ocasiona a retração; (THOMAZ, 2020)
- d) Retração plástica, que ocorre com a massa no estado plástico e que provém da evaporação da água durante a pega ou da sua percolação de regiões mais pressionadas para regiões menos pressionadas (THOMAZ, 2020).

Diversos fatores podem influenciar na retração, como a composição química e finura do cimento, a quantidade de cimento adicionada à mistura, a granulometria dos agregados, a quantidade de água na mistura e as condições de cura (THOMAZ, 2020).

A resistência do concreto está diretamente relacionada à relação água/cimento, ou seja, de maneira geral, quanto menor a relação água/cimento, maior a resistência à compressão do concreto (HELENE E TERZIAN, 1993). A figura a seguir ilustra a influência da relação água/cimento na resistência à compressão em diferentes idades do concreto.

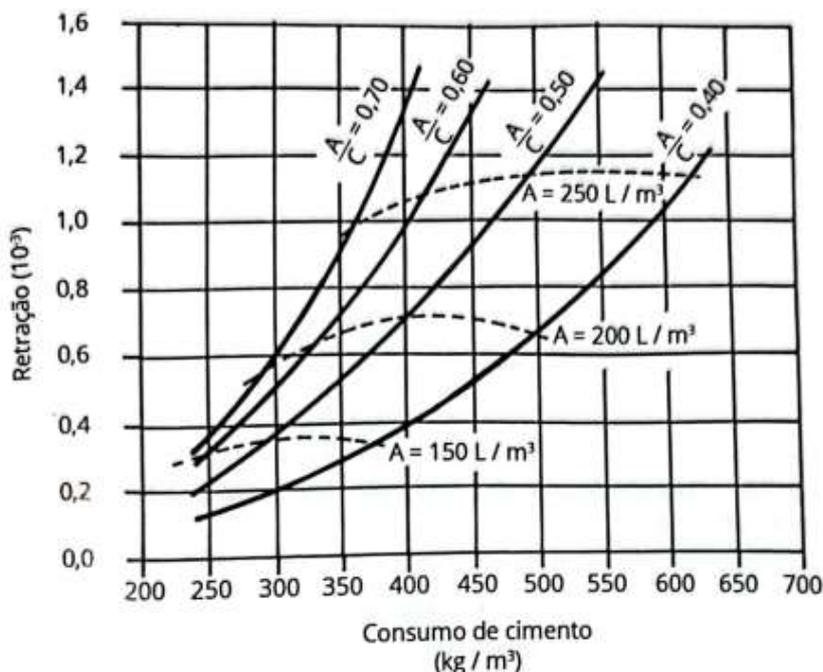
Figura 3 - Resistência Média a Compressão em função da relação água/cimento e da idade para os cimentos tipo CP 32.



Fonte: Helene e Terzian, 1993

Todavia, concretos com menor relação água/cimento possuem maior calor de hidratação, favorecendo retrações excessivas e consequente fissuração, conforme ilustrado na figura abaixo.

Figura 4 - Retração do concreto em função do consumo de cimento e da relação água/cimento



Fonte: THOMAZ, 2020.

Dessa forma, especialmente para concretos com baixas relações água/cimento, deve haver um controle rigoroso na concretagem, efetuando uma cura adequada e evitando assim a incidência de fissuras no material.

4.3.2. Erosão do concreto

Os danos de erosão por abrasão resultam do efeito abrasivo do lodo, areia, cascalho, rochas, gelo e outros detritos presentes no fluido, colidindo com a superfície do concreto durante a operação da uma estrutura hidráulica. A erosão por abrasão é facilmente reconhecida pelo fato da superfície do concreto se apresentar lisa e com aparência desgastada, diferentemente dos danos causados pela cavitação, que resultam em uma aparência esburacada e irregular no concreto (GRAHAM et al., 1998).

A taxa de erosão depende de vários fatores, como o tamanho, forma, quantidade e dureza das partículas sendo transportadas pelo fluido, bem como da velocidade da água e da qualidade do concreto (permeabilidade e porosidade) (GRAHAM et al., 1998).

4.3.3. Lixiviação

A lixiviação do concreto refere-se ao processo de alteração causado pela descalcificação da pasta de cimento devido à dissolução de suas fases sólidas. A lixiviação pode ter efeitos significativos nas características físicas do material, podendo levar o concreto à perda de alcalinidade, massa e resistência mecânica (ROSENQVIST et al., 2017).

A lixiviação ocorre nos materiais cimentícios quando estes são expostos a líquidos renovados constantemente, como a água pura, destilada, deionizada, doce ou dessalinizada, já que esta age como solvente (NEUMANN, 2019). Este processo é agravado na presença de água em movimento, uma vez que o suprimento contínuo de água impede que haja aumento na concentração de Ca^{2+} (ROSENQVIST et al., 2017).

A água tende a hidrolisar os produtos da hidratação que contém cálcio, como o CH , o $C-S-H$ e o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A lixiviação é, portanto, um processo de degradação química que compreende dois mecanismos: a dissolução das fases sólidas e a difusão dos íons dissolvidos para o exterior (NEUMANN, 2019).

Após dissolvidos e transportados para o exterior da estrutura, estes elementos se solidificam novamente, formando manchas esbranquiçadas na superfície do concreto, ou, em casos mais desenvolvidos da manifestação patológica, a formação de estalactites, conforme ilustra a figura abaixo.

Figura 5 - Manchas esbranquiçadas e formação de estalactites devido à lixiviação do concreto.



Fonte: autora.

4.3.4. Corrosão da armadura

A corrosão das armaduras tem sido uma das principais causas de sinistros na construção civil, acarretando enormes prejuízos financeiros e, infelizmente, várias vítimas (MARCELLI, 2007).

De acordo com a National Association of Corrosion Engineers (NACE International), o custo global da corrosão é estimado em U\$ 2,5 trilhões, o equivalente a cerca de 3,4% do PIB mundial (2015). A corrosão e seus efeitos têm um impacto profundo na infraestrutura e edifícios de países em todo o mundo, que começam a apresentar mau desempenho e condições inseguras associadas a instalações e seu uso (SALES et al., 2018).

Corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou a combinação destas. São exemplos de ações físicas os fenômenos de erosão e cavitação, como ação eletroquímica tem-se a corrosão dos metais em meio aquoso, e como ação química as reações de expansão e lixiviação dos compostos hidratados da pasta de cimento Portland (HELENE, 1993).

Toda corrosão do aço à temperatura ambiente em meio aquoso é de natureza eletroquímica, ou seja, pressupõe a existência de uma reação de oxirredução e a circulação de íons num eletrólito. Essa corrosão eletroquímica, no caso das armaduras de concreto, conduz à formação de óxidos/hidróxidos de ferro, denominados “produtos da corrosão” (SALES et al., 2018).

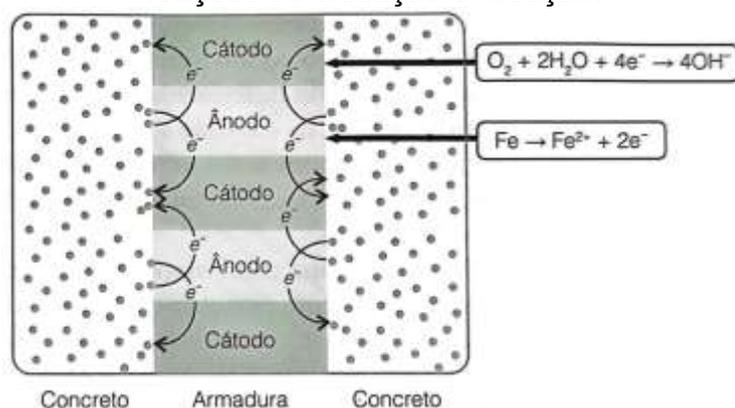
A corrosão eletroquímica é causada pela ação de um agente oxidante, como o oxigênio, que, ao entrar em contato com a superfície do metal, passa a receber elétrons, ocasionando, assim, a reação de redução. Esses elétrons consumidos na reação de redução, que ocorre no cátodo, são fornecidos pela reação de oxirredução do metal que ocorre no ânodo, sendo transferidos para o cátodo através do metal, que atua como um eletrodo. Ao sofrer oxidação, o metal perde elétrons e se transforma em um cátion, que se desprende da estrutura metálica, resultando na dissolução do metal (SALES et al., 2018).

As reações que acontecem em um processo de corrosão eletroquímica em uma estrutura de concreto armado são:

- A reação anódica (oxidação): $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$
- A reação catódica (redução): $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$

A figura a seguir contém uma representação esquemática deste processo em uma armadura de aço em estrutura de concreto armado.

Figura 6 - Representação esquemática do processo de corrosão eletroquímica presente na armadura de aço de uma estrutura de concreto armado envolvendo as reações de oxidação e redução.



Fonte: SALES et al., 2018.

4.3.4.1. Camada passivadora

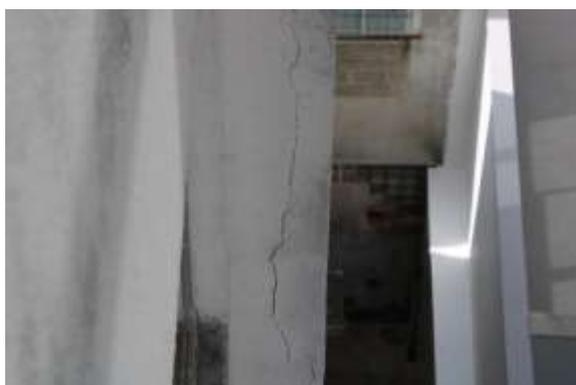
Entende-se por passivação como a resistência à corrosão proporcionada por uma película fina de um filme de óxido estável e aderente formado na superfície do metal (HELENE, 1993).

Quando a armadura de aço está em contato com o concreto na estrutura, esta normalmente encontra-se exposta a um pH em torno de 12. Neste pH, a armadura possui em sua superfície um filme de Fe_3O_4 , um composto compacto e aderente que atua como uma barreira entre o meio corrosivo e a superfície do aço, diminuindo significativamente a taxa de dissolução da armadura e tornando-as protegidas contra a corrosão (SALES et al., 2018). Este filme de proteção é chamado de camada passivadora, a qual pode ser desestabilizada com a alteração do pH do concreto pela ação da carbonatação, ou ser destruída pela ação de íons cloreto, deixando a armadura suscetível à corrosão.

4.3.4.2. Identificação da manifestação patológica

A corrosão de armaduras em concreto se manifesta na forma de manchas superficiais causadas pelos produtos da corrosão, seguidas por fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da seção resistente das armaduras com frequente seccionamento de estribos, redução e eventual perda de aderência das armaduras principais, ou seja, deteriorações que levam a um comprometimento estético e da segurança estrutural ao longo do tempo (SALES et al., 2018).

Figura 7 – Fissura devido a corrosão da armadura do concreto.



Fonte: autora.

Figura 8 - Armadura exposta devido ao destacamento do concreto de cobrimento.

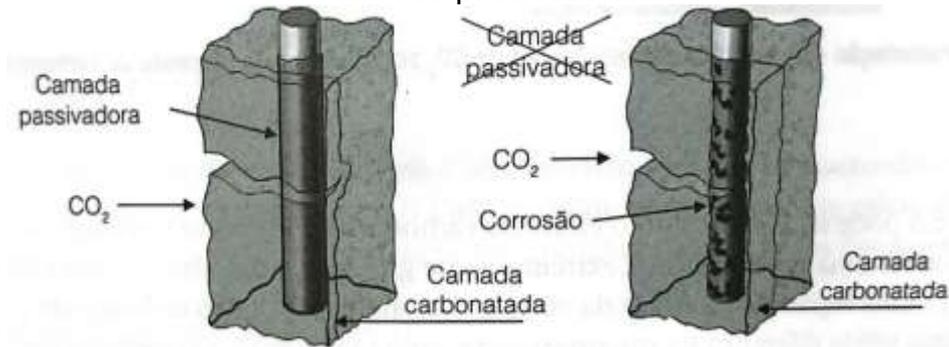


Fonte: autora.

4.3.5. Processo de carbonatação

O concreto, ao ser exposto a gases como o gás carbônico (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S), pode sofrer a redução do pH da solução existente nos seus poros. A alta alcalinidade nessa solução intersticial devido, principalmente, à presença do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) proveniente das reações de hidratação do cimento, também pode ser reduzida. Essa perda de alcalinidade no processo de neutralização causado, principalmente, pela ação do gás carbônico, que transforma os compostos do cimento em carbonatos, é o mecanismo denominado carbonatação. O pH de precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) é cerca de 9,4 à temperatura ambiente, alterando, portanto, as condições de estabilidade química da camada passivadora do aço, conforme ilustra a figura a seguir (SALES et al., 2018).

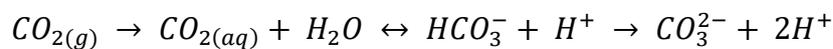
Figura 9 - Representação do avanço da frente de carbonatação e destruição da camada passivadora.



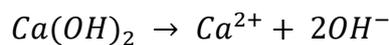
Fonte: SALES et al., 2018.

MONTEMOR et al. (2002) apresenta o processo de carbonatação simplificado em quatro etapas:

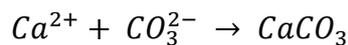
- 1) Difusão do CO_2 para o interior do concreto:



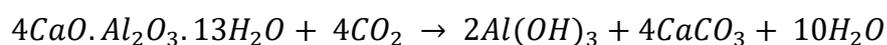
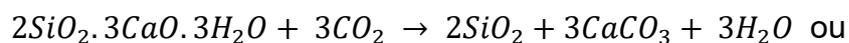
- 2) Na solução dos poros do cimento são disponibilizados os íons OH^- e Ca^{2+} , provenientes da dissolução do hidróxido de cálcio:



E o CO_3^{2-} reage com o Ca^{2+} , formando o carbonato de cálcio:



- 3) Ocorre a reação com silicatos e aluminatos:



- 4) Passo final do processo de carbonatação, que sempre produz carbonato de cálcio e água: $Ca(OH)_2 + CO_{2(aq)} \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

A carbonatação é facilitada quando o concreto não apresenta uma qualidade adequada. Fatores como uma alta relação água/cimento, pequenas espessuras de recobrimento, baixas quantidades de cimento e ciclos de umedecimento e secagem são condições que favorecem a velocidade de carbonatação. Já elevadas reservas de hidróxido de cálcio, a boa compactação e um processo de cura adequado podem retardar esse processo. (SALES et al., 2018).

A redução do pH por si só, porém, não é suficiente para acarretar danos estruturais devido a corrosão das armaduras, havendo outros fatores relevantes para

o desencadeamento destes processos no concreto carbonatado, como a presença de umidade e as variações de temperatura (ANGST et al., 2020).

Apesar da indução da corrosão por carbonatação geralmente apresentar-se menos agressiva em comparação com a ocasionada por íons-cloreto, ao longo de maiores períodos de tempo esta pode ocasionar danos significativos (ANGST et al., 2020).

4.3.6. Ataque por cloretos

É comum a incorporação de elementos agressivos no processo de preparo do concreto, muitas vezes por falta de conhecimento técnico. Dentre estes agentes agressivos, um dos mais comuns é o cloreto (íons Cl^-), que pode ser adicionado involuntariamente a partir de aditivos aceleradores de pega, agregados, ou até mesmo água contaminada e tratamentos de limpeza. Ademais, o cloreto de sódio também é muito utilizado como sal fundente em estruturas congeladas. (SALES et al., 2018).

Ao penetrar no concreto, parte dos cloretos liga-se quimicamente aos compostos que contêm aluminatos (C_3A e C_4AF), formando o sal de Frieddel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$), parte é adsorvida pelo gel amorfo de silicato de cálcio hidratado ($C-S-H$), e uma outra parte encontra-se livre para interagir com processos corrosivos (PRUNCKNER, F.; GJØRV, O.E., 2004).

A penetração dos cloretos no concreto acontece por ação de um mecanismo duplo, de sucção e depois difusão. Os ânions Cl^- podem destruir a camada passivadora proporcionada pelo meio alcalino e acelerar permanentemente a corrosão, sem consumir-se. Dessa forma, até mesmo pequenas quantidades de cloreto podem ser responsáveis por grandes processos corrosivos. (SALES et al., 2018).

4.3.7. Manchas de umidade/bolor

Essa anomalia é caracterizada pela existência de manchas ou pontos pretos, acinzentados ou amarronzados sobre a superfície. Aparece, geralmente, em áreas úmidas ou que recebem pouca ou nenhuma luz do sol, como banheiros, cozinhas ou lavanderias (POLITO, 2006).

Figura 10 – Manchas de umidade/bolor.



Fonte: autora.

4.3.8. Empolamento/descolamento da pintura

Essa manifestação patológica é caracterizada pelo aparecimento de bolhas nas superfícies pintas devido à perda de adesão da película de tinta, ocasionando o levantamento do filme. É causada pela infiltração de umidade através das paredes externas ou pela exposição da superfície recém pintada à umidade, principalmente se não houver adequada preparação da superfície (POLITO, 2006).

Figura 11 - Empolamento e descolamento da pintura.



Fonte: autora.

4.4. ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)

De acordo com a NBR 12216:1992 uma estação de tratamento de água é o conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade.

A água é conduzida dos mananciais até a ETA através de adutoras e as principais unidades que compõem o seu tratamento são:

- a) **Mistura rápida:** Operação destinada a dispersar produtos químicos na água a ser tratada, em particular no processo de coagulação, para o qual são destinadas as disposições seguintes;
- b) **Floculadores:** São unidades utilizadas para promover a agregação de partículas formadas na mistura rápida;
- c) **Decantadores:** São unidades destinadas à remoção de partículas presentes na água, pela ação da gravidade;
- d) **Filtros:** São unidades destinadas a remover partículas em suspensão, em caso de a água a tratar ser submetida a processo de coagulação, seguido ou não de decantação, ou quando comprovado que as partículas capazes de provocar turbidez indesejada possam ser removidas pelo filtro, sem necessidade de coagulação.

Neste trabalho foram objeto de estudo as estruturas destinadas às etapas de floculação, decantação e filtração

5. METODOLOGIA

5.1. OBJETO DE ESTUDO

Para efeitos de análise deste trabalho foi selecionado um objeto de estudo, que consiste em uma Estação de Tratamento de Água (ETA).

A ETA faz parte do Sistema Integrado de Abastecimento de uma microrregião situada no interior do Brasil, o qual atende cinco municípios, possuindo uma população total atendida de aproximadamente 90 mil habitantes e uma vazão média anual do sistema de 330 L/s.

A ETA do sistema integrado foi construída na década de 1970, é do tipo convencional completo, seguindo as etapas: Mistura rápida – Floculação – Decantação – Filtração – Desinfecção. Possui um módulo principal, cuja estrutura se dá por paredes de concreto armado, e um módulo secundário, que consiste em uma ETA metálica de capacidade reduzida, que serve como complementação para o serviço de abastecimento. A Figura 12 ilustra a vista superior do objeto de estudo, com a indicação dos módulos de tratamento.

Figura 12 – Vista superior do objeto de estudo.



Fonte: Autora, 2022.

Apesar de na época de sua construção não existir ainda a NBR 6118, podemos definir sua classe de agressividade ambiental (CAA) como Classe IV, por tratar-se de um sistema de tratamento de água, onde as estruturas de concreto armado comumente ficam sujeitas à ação de substância agressivas.

5.1.1. Histórico

A ETA do sistema integrado foi inaugurada no ano de 1971, estando em operação há 51 anos.

Através de anamneses junto aos funcionários da Empresa, constatou-se que foram realizadas algumas manutenções preventivas e corretivas pontuais nos componentes da ETA, além de realizadas algumas obras de melhorias e ampliações ao longo desses anos.

Analisando o acervo de fotos da Empresa, mostrados na Figura 13 e Figura 15, observa-se que os layouts e disposições gerais são condizentes com as atuais (Figura 14 e Figura 16), ou seja, não houveram grandes alterações e ou reformas significativas.

Figura 13 – Imagem do decantador e das cortinas de difusão.



Fonte: acervo histórico da Empresa.

Figura 14 – Foto das condições atuais da ETA.



Fonte: autora.

Figura 15 - Imagem geral da ETA.



Fonte: acervo histórico da Empresa.

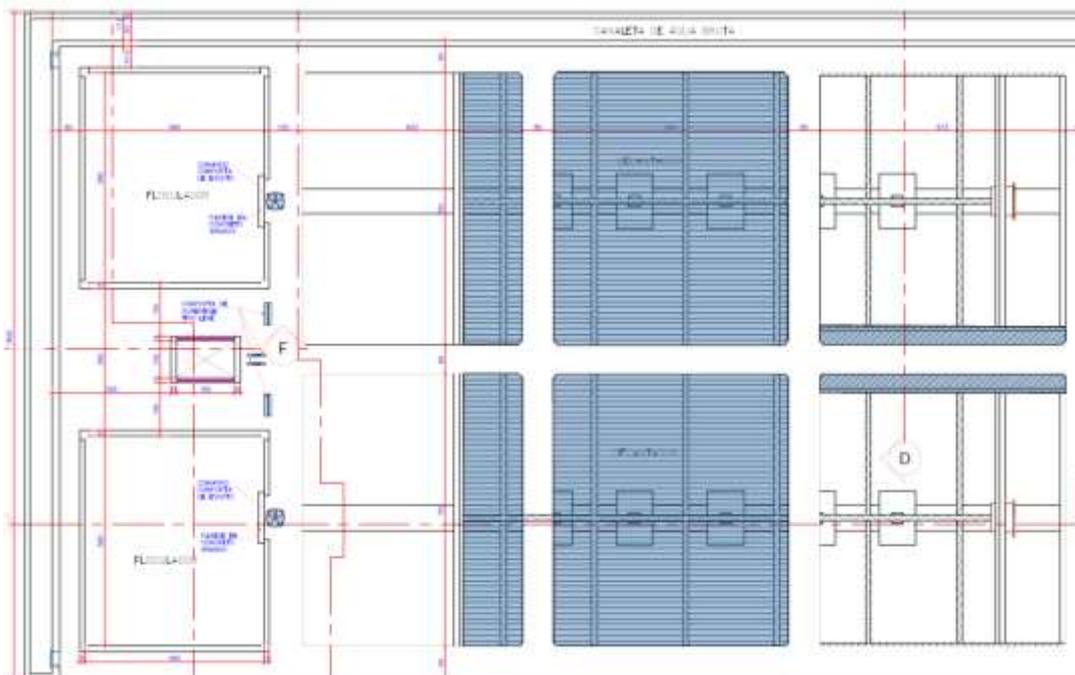
Figura 16 - Foto das condições atuais da ETA.



Fonte: autora.

Por meio das imagens representadas a seguir e dos projetos fornecidos, foi possível observar algumas intervenções nos módulos principais de tratamento. Ressalta-se que foi realizada a ampliação do nível de água em toda a ETA, a qual resultou na necessidade da execução de vigas de reforço em determinadas localidades do decantador. Além disso, foram criados elementos estruturais para sustentação das novas cortinas de difusão e ampliações nas paredes da canaleta de água bruta. Todas essas informações foram coletadas por meio dos projetos fornecidos e estão sintetizadas nas Figura 17 e Figura 18.

Figura 17 - Recorte do projeto arquitetônico, indicando em azul os locais que houve intervenções.



Fonte: Empresa.

5.2.1. Inspeção visual

Para diagnóstico das anomalias foi realizada a avaliação visual e sensorial da estrutura, através da execução de vistorias e efetuando o registro fotográfico de todas as manifestações patológicas constatadas para posterior análise. Para tal, foram realizadas duas vistorias no imóvel objeto de estudo, nos dias 18/05/2022 e 25/05/2022, nas quais foram inspecionadas as estruturas externas de todas as instalações, e as estruturas internas dos decantadores, seguindo as recomendações da NBR 13752:1996.

Ambas as vistorias foram realizadas no período da manhã, pois é neste período que é efetuado o esvaziamento dos módulos de decantação para que sejam realizados os serviços de higienização no interior dos mesmos.

5.2.2. Inspeção das propriedades do concreto

Para caracterização das manifestações patológicas presentes no interior dos decantadores da ETA foram realizados ensaios não destrutivos, como o ensaio de esclerometria e o mapeamento das armaduras com pacômetro, bem como ensaio destrutivo, que consistiu na extração de testemunhos, para análise em laboratório da resistência mecânica do concreto e para que fossem efetuados os ensaios químicos, como a determinação da frente de carbonatação e a verificação da presença de íons-cloreto no concreto.

5.2.2.1. Esclerometria

O ensaio de esclerometria é utilizado na determinação da dureza superficial do concreto, através da utilização do esclerômetro. O equipamento consiste em uma massa-martelo impulsionada por um sistema de molas para chocar-se com a superfície. Quanto maior for a dureza da superfície, menor será a parcela da energia que se converterá em deformação permanente, resultando também em um maior recuo da massa martelo. Após o impacto, o aparelho registra o valor de rebote R, que pode ser correlacionado com a dureza e resistência à compressão do concreto.

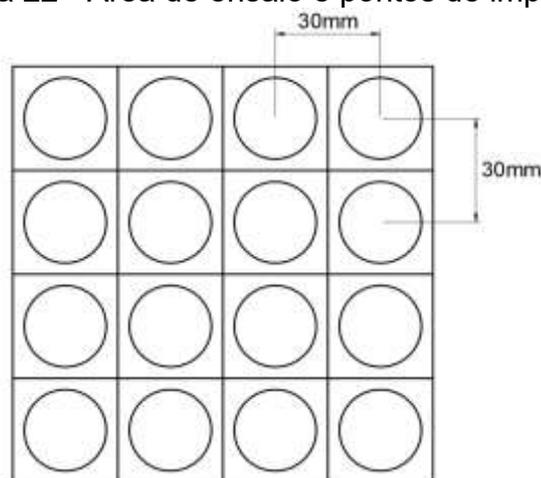
Para se obter uma relação correta da dureza do concreto com o valor de rebote devem ser considerados os seguintes fatores:

- A direção do impacto: deve ser sempre perpendicular à superfície de teste e deve ser levado em consideração se a medição será realizada na horizontal (0°), vertical ($+90^\circ$), ou vertical (-90°);
- A idade do concreto;
- A forma geométrica do material (plano ou cilíndrico);
- As dimensões do concreto (o esclerômetro Tipo N pode ser utilizado para testar concretos com espessura maior do que 100 mm e partículas de concreto com tamanhos menores que 32mm);
- As condições da superfície (que deve ser lixada com uma pedra abrasiva, tornando-a mais lisa antes do ensaio).

Foram selecionadas 13 áreas na estação para realização do ensaio, em diferentes localidades e elementos estruturais do objeto de estudo, com o intuito de abranger todos os tipos de concreto utilizados durante a execução das obras. O ensaio foi realizado seguindo as diretrizes da norma NBR 7584:2012.

As superfícies foram previamente preparadas com polimento com disco de carborundum, conforme recomenda a NBR 7584:2012. Em cada área de ensaio foram efetuados 16 impactos, distribuídos uniformemente na área de ensaio, conforme ilustra a Figura 22. A distância entre pontos de impacto deve ser de no mínimo 30 mm e cada ponto deve receber apenas um impacto. Caso ocorra de um mesmo ponto receber dois impactos, a segunda leitura deve ser descartada.

Figura 22 - Área de ensaio e pontos de impacto.



Fonte: NBR 7584:2012.

Os impactos devem ser evitados sobre armaduras, bolhas e similares, pois não representam o concreto em avaliação. A preparação da superfície e a execução dos impactos são ilustradas a seguir na Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 - Polimento da superfície com disco de carborundum.



Fonte: autora.

Figura 24 - Execução dos impactos em área de ensaio.



Fonte: autora.

5.2.2.1.1. Resultados

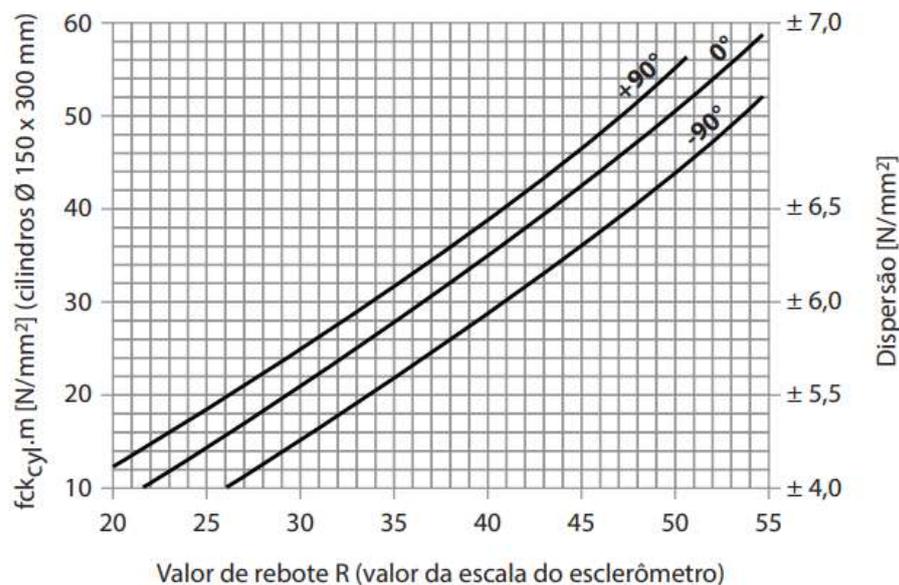
Para interpretação dos resultados deve-se calcular a média aritmética dos 16 valores individuais (impactos) dos índices esclerométricos correspondentes a uma única área de ensaio.

Qualquer índice esclerométrico que estiver afastado em mais de 10% do valor médio obtido deve ser desprezado, e então a média deve ser recalculada com as leituras válidas. O processo então deve ser repetido até que se obtenha apenas valores válidos. Nenhum dos índices esclerométricos individuais restantes deve diferir em mais de 10% da média final.

O índice esclerométrico médio final deve ser obtido com no mínimo cinco valores individuais. Se isso não for possível com as leituras obtidas, o ensaio esclerométrico da área em questão deve ser desconsiderado.

Para obtenção da relação do valor do rebote com a resistência à compressão do concreto devem ser utilizados os gráficos de correlação fornecidos pelo fabricante do equipamento, levando em consideração o formato cilíndrico do concreto e o ângulo de 0° do aparelho, sempre utilizado na direção horizontal. O gráfico de correlação correspondente é apresentado a seguir na Figura 25.

Figura 25 - Ábaco para correlação entre o valor de rebote, resistência superficial do concreto e dispersão.



Fonte: Metrotokyo – Manual de instruções do equipamento.

É importante ressaltar que a utilização de dados obtidos somente pelo esclerômetro não é suficiente para eventuais análises estruturais do objeto de estudo, visto que existem diversos fatores que influenciam significativamente nos resultados obtidos, entre eles:

- Carbonatação do concreto;
- Condições de umidade da superfície;
- Massa específica do concreto;
- Esbeltez do elemento estrutural ensaiado;
- Proximidade entre a área de ensaio e uma falha no concreto;
- Temperatura do esclerômetro e do concreto;
- Dosagem do concreto.

5.2.2.2. Mapeamento das armaduras

Para o mapeamento das armaduras das paredes de concreto armado foi efetuado ensaio de pacometria, que é um ensaio não destrutivo através do qual se é possível obter a localização das barras de aço no interior do concreto por meio de

indução magnética. A realização do ensaio está representada na Figura 26 e na Figura 27.

Figura 26 - Utilização do pacômetro para obtenção da posição das barras de aço.



Fonte: autora.

Figura 27 - Medição do afastamento das barras após mapeamento com pacômetro.



Fonte: autora.

Juntamente com o ensaio de pacometria, nos locais onde foram realizadas extrações de testemunhos foi aferida a seção transversal das armaduras expostas com auxílio de paquímetro digital, conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 – Medições de armadura após abertura para extração de testemunho. Ressalta-se que existe um pequeno erro na medição, visto que não foi possível realizar a devida limpeza no concreto nas proximidades das barras.



Fonte: autora.

Salienta-se que durante o processo de extração de testemunhos houve diversos rompimentos de armaduras, evidenciando assim que existe uma diferenciação de armaduras entre a face tracionada e comprimida das paredes laterais da ETA.

5.2.2.3. *Determinação da resistência à compressão através de testemunhos*

Devido à falta de projetos estruturais da ETA e para se obter um panorama das condições atuais do concreto no local foi feita a determinação da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) através da extração de 5 testemunhos. Estes foram tomados nas faces externas das paredes dos decantadores, de modo a não perfurar a impermeabilização dos mesmos.

Primeiramente, foi realizada a tentativa de extração de 5 corpos de prova seguindo as recomendações da NBR 7680:2015, ou seja, com a dimensão de 100 mm ou 75 mm. Porém, na ocasião da primeira vistoria foi feita a extração de apenas 1 testemunho válido para realização do ensaio, já que não foi possível realizar o corte nos demais pontos sem que houvesse interferência de armaduras.

Figura 29 - Extração de testemunho de 75 mm de diâmetro na ocasião da primeira vistoria.



Fonte: autora.

Desta forma, foi utilizado como base um estudo de uma tese de doutorado, realizada por VIEIRA FILHO (2007), para extração de testemunhos em menores dimensões.

Na tese é testada empiricamente a possibilidade da utilização de minitestemunhos para o ensaio de resistência à compressão axial no concreto. Desta forma, para preservar as armaduras das paredes dos decantadores, e obter um valor mais preciso da resistência do concreto, optou-se pela extração de mais 4 corpos de prova com apenas 50 mm de diâmetro.

Após extração, foi realizado o ensaio de resistência à compressão em todos os corpos de prova extraídos, conforme ilustram as figuras abaixo.

Figura 30 - Realização do rompimento do corpo de prova padrão extraído na 1ª vistoria.



Fonte: autora.

Figura 31 - Realização do rompimento de um dos 4 minitestemunhos extraídos.



Fonte: autora.

5.2.2.4. Ensaio de carbonatação

A partir dos testemunhos extraídos, também foi efetuado ensaio para determinação da frente de carbonatação do concreto, com auxílio de solução de fenolftaleína¹, aplicada diretamente nos corpos de prova. Após a aplicação do indicador ácido-base, a região pode apresentar coloração rosada (pH Básico), ou incolor (pH Ácido), essa última evidenciando a carbonatação do concreto.

Foi realizada a aspersão de solução de fenolftaleína (1%) em todos os corpos de prova e medida a frente de carbonatação com auxílio de paquímetro digital, conforme ilustra a Figura 32 a Figura 35.

¹ Solução de fenolftaleína: indicador ácido-base. Adquire coloração avermelhada ou rosa bem intensa em meios básicos (pH acima de 8,2-10), porém fica incolor em meios ácidos.

Figura 32 - Produto utilizado no ensaio.



Fonte: autora.

Figura 33 - Aspersão da solução de fenolftaleína em um dos testemunhos.



Fonte: autora.

Figura 34 - Mudança na coloração do corpo de prova após aspersão do produto.



Fonte: autora.

Figura 35 - Medição da frente de carbonatação com paquímetro digital.



Fonte: autora.

5.2.2.1. *Ensaio de determinação da presença de íons-cloreto*

Para verificar a presença de íons cloreto no concreto foi realizado ensaio com aspersão de Nitrato de Prata (AgNO_3). A utilização desse produto ocasiona uma reação fotoquímica em coloração Branca, caso exista a presença de íons livres de cloreto no concreto.

A realização do ensaio é ilustrada na Figura 36 e na Figura 37.

Figura 36 - Produto utilizado no ensaio.



Fonte: autora.

Figura 37 - Aspersão do nitrato de prata em um dos testemunhos.



Fonte: autora.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

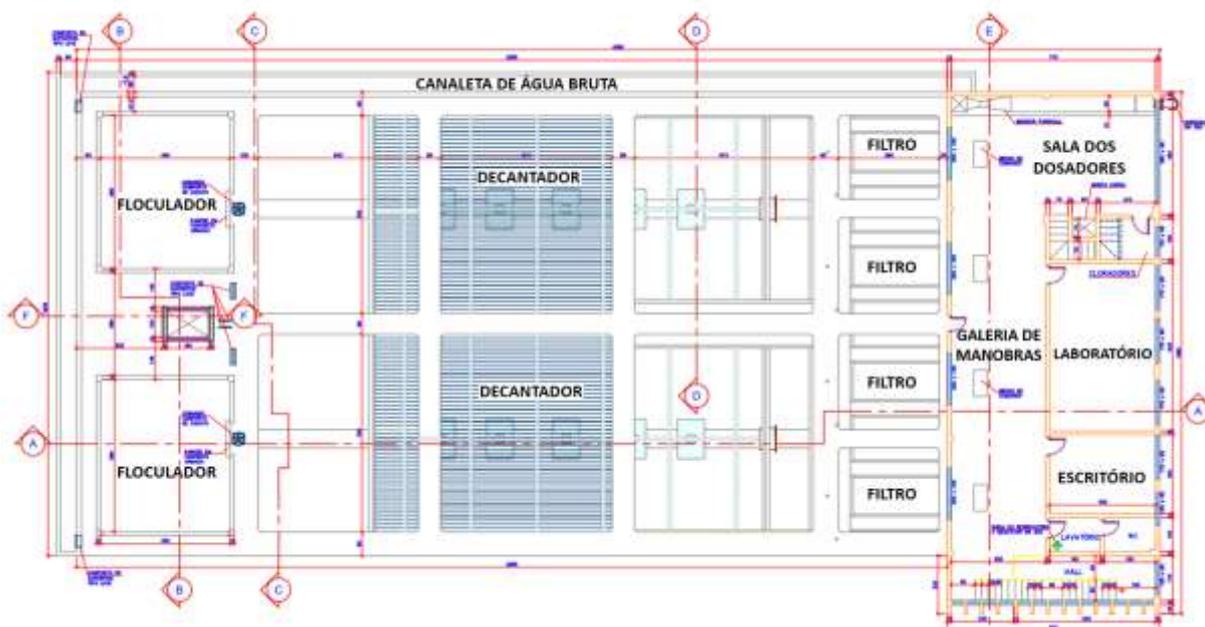
6.1. DANOS E INCONFORMIDADES

As manifestações patológicas constatadas na edificação estão diretamente associadas à processos de manutenção inadequados, principalmente no sistema de impermeabilização, resultando em uma degradação mais avançada dos demais elementos construtivos. As manifestações patológicas constatadas estão representadas a seguir:

- Infiltrações;
- Empolamento e descolamento da pintura (área externa);
- Exposição de armadura e corrosão;
- Lixiviação do concreto;
- Fissuras.

Os danos foram analisados e categorizados por módulos da Estação de Tratamento, conforme ilustra a Figura 38. Os subcapítulos a seguir estão divididos de acordo com esta metodologia e contêm a descrição dos danos contatados no local.

Figura 38 - Identificação dos módulos da ETA.



Fonte: adaptado do projeto fornecido pela Empresa.

6.1.1. Canaletas de água bruta

No módulo principal da ETA há uma canaleta de concreto destinada ao transporte da água bruta até as fases de tratamento. Sua estrutura é majoritariamente em concreto armado, porém esta foi ampliada com blocos de concreto. A Figura 39 e a Figura 40 ilustram o elemento citado.

Figura 39 - Vistas gerais da canaleta de água bruta.



Fonte: autora.

Figura 40 - Vistas gerais da região superior da canaleta de água bruta.



Fonte: autora.

A canaleta apresenta falhas na sua impermeabilização, resultando no desenvolvimento de diversas manifestações patológicas associadas à umidade, devido à infiltração de água no concreto.

Por se tratar de uma região onde há fluxo constante de fluido em alta velocidade, sendo este repleto de partículas sólidas menores, o desgaste da impermeabilização aconteceu mais rapidamente devido ao fenômeno da erosão, deixando a estrutura de concreto armado e os blocos sujeitos ao mesmo fenômeno, agravando ainda mais os problemas oriundos de infiltração. A Figura 41 e a Figura 42

ilustram as vistas gerais da parte interna da canaleta. Nota-se a deterioração do sistema de impermeabilização, de modo que o concreto, os blocos e o reboco se encontram completamente expostos à água.

Figura 41 - Aspecto geral da canaleta de água bruta.



Fonte: autora.

Figura 42 - Aspecto geral da impermeabilização da canaleta. Nota-se que esta encontra-se praticamente toda gasta, não conferindo mais estanqueidade à calha.



Fonte: autora.

Devido às infiltrações, foram efetuados alguns reparos paliativos na canaleta com cimento de pega ultrarrápida. Estes reparos, porém, não foram suficientes para sanar as infiltrações, de modo que está ocorrendo lixiviação do material na região, evidenciada pelos depósitos de carbonato de cálcio na superfície, conforme ilustra a Figura 43 a Figura 45. Nota-se, ainda, que a região mais afetada é a região da emenda da estrutura original com a ampliação, devido a incidência de fissuras de amarração no local.

Figura 43 - Manchas esbranquiçadas (depósitos de carbonato de cálcio) devido à lixiviação do concreto.



Fonte: autora.

Figura 44 - Manchas esbranquiçadas (depósitos de carbonato de cálcio) devido à lixiviação do concreto por falhas na impermeabilização da canaleta. Na região foi efetuado reparo com cimento de pega ultrarrápida, porém, este foi insuficiente para impedir as infiltrações



Fonte: autora.

Figura 45 - Depósitos de carbonato de cálcio devido à lixiviação do concreto por falhas na impermeabilização da canaleta, permitindo a infiltração de água através de uma fissura presente na estrutura.



Fonte: autora.

Ademais, foram observadas também manchas de umidade, empolamento e o descolamento da pintura em diversas regiões nas faces externas da canaleta. A Figura 46 e a Figura 47 ilustram as anomalias citadas.

Figura 46 - Manchas de umidade e empolamento da pintura na face inferior da canaleta, nos fundos do módulo de tratamento, ocasionados por falhas na impermeabilização do elemento.



Fonte: autora.

Figura 47 - Manchas de umidade e empolamento da pintura na face inferior da canaleta, nos fundos do módulo de tratamento, ocasionados por falhas na impermeabilização do elemento.



Fonte: autora.

Foram observadas também algumas fissuras de origem higroscópica, que se desenvolveram devido à infiltração de água no concreto pela impermeabilização deficiente, conforme ilustra a Figura 48 e a Figura 49.

Figura 48 - Fissuras de origem higroscópica na lateral da canaleta. Devido à abertura destas fissuras, está ocorrendo também a lixiviação do concreto na região, bem como o empolamento da pintura.



Fonte: autora.

Figura 49 - Fissuras de origem higroscópica ocasionadas pela ausência de pingadeira sobre a canaleta, permitindo a retenção de água na superfície.



Fonte: autora.

Nota-se também a presença de fissuras de amarração na interface da estrutura antiga da canaleta com a estrutura ampliada, conforme ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Fissura de amarração devido à ampliação da canaleta de concreto. Nota-se a ocorrência de infiltrações através da mesma, devido a falhas na impermeabilização da canaleta.



Fonte: autora.

Devido às infiltrações no concreto, surgiram sinais de corrosão da armadura, identificável pela presença de fissuras características deste processo, conforme ilustra a Figura 51.

Figura 51 - Fissura característica de processos de corrosão na armadura, ocasionada por falhas na impermeabilização, permitindo a infiltração de água na estrutura



Fonte: autora.

Foi executado um tratamento paliativo nos focos de corrosão da armadura, no qual as regiões com concreto deslocado foram preenchidas utilizando cimento de pega ultrarrápida. Porém, essa solução não é suficiente para impedir a progressão dos danos, uma vez que a impermeabilização da canaleta se encontra comprometida. A Figura 52 ilustra a anomalia citada.

Figura 52 – Regiões com focos de corrosão da armadura nas quais foram realizados reparos paliativos.



Fonte: autora.

6.1.1. Passarelas

Nó módulo principal de tratamento há passarelas para o tráfego dos colaboradores no local, que são trechos maciços de concreto situados na parte superior das paredes, e servem também como travamento (em forma de tirantes) para a estrutura. A Figura 53 ilustra as vistas gerais das passarelas.

Figura 53 - Vistas gerais das passarelas de concreto.



Fonte: autora.

Foram observados sinais avançados de corrosão da armadura nestes elementos, principalmente em sua face inferior. Tais danos são decorrentes do cobrimento insuficiente do concreto, bem como devido à sua exposição constante à umidade e ao vapor da água com adição de produtos químicos, tornando o ambiente extremamente agressivo ao material. A Figura 54 ilustra a anomalia citada.

Figura 54 – Exposição e corrosão das armaduras na face inferior das passarelas.



Fonte: autora.

Foram constatadas também diversas fissuras por toda a extensão das passarelas, conforme ilustra a Figura 55 e a Figura 56. Como estas estruturas atuam como tirantes para as paredes de concreto armado, elas estão constantemente sujeitas à esforços de tração, sendo estes esforços responsáveis pela fissuração do elemento.

Figura 55 - Fissuras ocasionadas por esforços de tração na laje.



Fonte: autora.

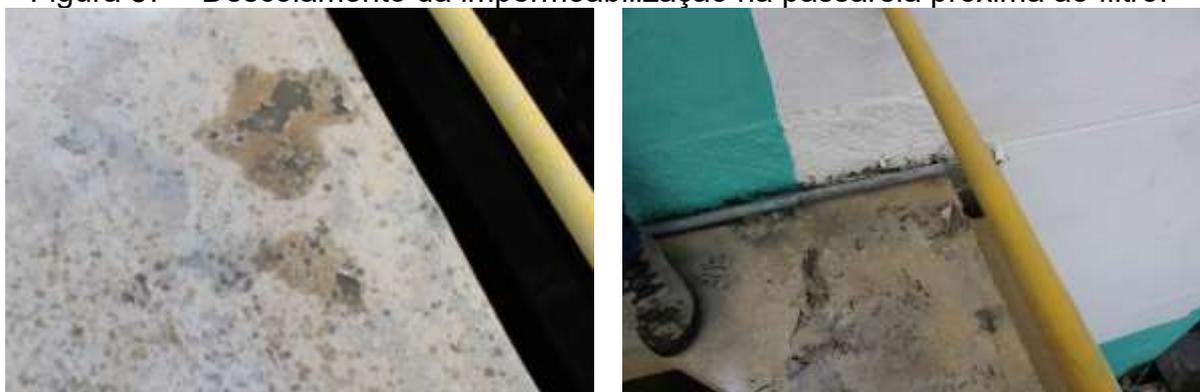
Figura 56 – Fissuras ocasionadas por esforços de tração na laje.



Fonte: autora.

Nas regiões das passarelas que receberam impermeabilização, nota-se o descolamento deste sistema no elemento, deixando a estrutura suscetível à ação da umidade, conforme ilustra a Figura 57, favorecendo assim o desencadeamento de processos de corrosão na estrutura.

Figura 57 – Descolamento da impermeabilização na passarela próxima ao filtro.



Fonte: autora.

6.1.2. Floculador

Nos módulos de floculação foram observadas algumas inconformidades, associadas principalmente à falta de manutenção do local. A Figura 58 ilustra a vista geral dos floculadores.

Figura 58 - Vista aérea dos floculadores do módulo principal de tratamento.



Fonte: autora.

Nos flocculadores e na região de interface com os decantadores, nota-se a deterioração do sistema de impermeabilização, não conferindo mais estanqueidade ao concreto, deixando-o exposto ao agente deletério (água) e resultando na incidência de infiltrações. A Figura 59 ilustra a vista geral da região entre flocculadores e decantadores e a Figura 60 ilustra a deterioração da impermeabilização.

Figura 59 – Vista geral da região entre o flocculador e o decantador.



Fonte: autora.

Figura 60 – Vista do fundo e da parede da região entre os flocculadores e decantadores. Nota-se a deterioração da impermeabilização, prejudicando a estanqueidade e deixando o concreto sujeito a infiltrações.



Fonte: autora.

Nota-se também a proliferação excessiva de limo, devido à processos de manutenção insuficientes no local, conforme ilustra a Figura 61.

Figura 61 – Proliferação de limo em excesso devido à falta de manutenção do espaço.



Fonte: autora.

Na mesma região também foram observados sinais de exposição e corrosão da armadura, conforme ilustra a Figura 62. Esta anomalia é decorrente do cobrimento insuficiente do concreto, além da falta de impermeabilização, permitindo que a armadura ficasse exposta à água, bem como aos produtos químicos utilizados no seu tratamento.

Figura 62 – Regiões com focos de corrosão da armadura nas paredes da região entre os floculadores e decantadores.



Fonte: autora.

Na região entre floculadores e decantadores foi observada também uma fissura de grande dimensão, ilustrada na Figura 63. A fissura possui características de ser originada devido à retração do concreto, visto que o mesmo possui uma elevada resistência, conforme aferido pelo ensaio de rompimento de testemunho.

Figura 63 – Fissura de retração agravada pela incidência de água em seu interior, observada na região entre flocluladores e decantadores.



Fonte: autora.

6.1.3. Decantador

De maneira geral, ambos os módulos de decantadores da estação apresentam uma grande deterioração do sistema de impermeabilização, de modo que as estruturas de concreto armado se encontram expostas à água, permitindo a ocorrência de infiltrações e podendo assim contribuir para que ocorra a corrosão da armadura e outras manifestações patológicas.

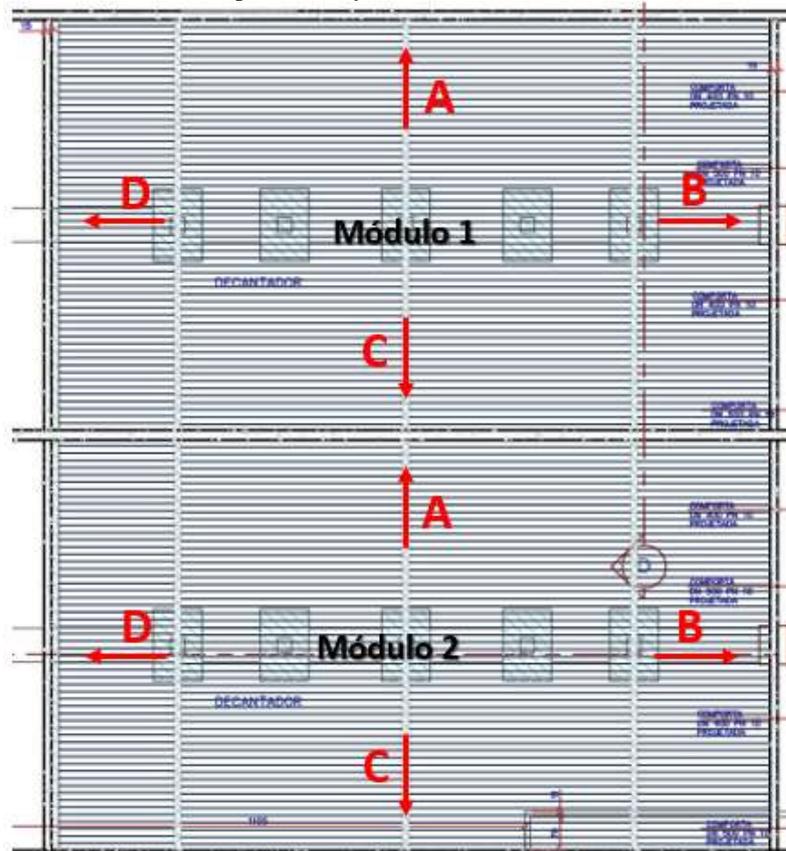
A seguir, são apresentadas as manifestações patológicas constatadas em cada um dos módulos de decantador da ETA, separados conforme ilustra a Figura 64 e com a localização dos danos identificadas conforme ilustrado na Figura 65.

Figura 64 - Identificação dos módulos de decantador.



Fonte: autora.

Figura 65 – Identificação das paredes nos módulos de decantação.



Fonte: autora.

6.1.3.1. Módulo 1

No Módulo 1 de decantação nota-se de maneira generalizada a deterioração do sistema de impermeabilização, deixando a estrutura de concreto armado exposta à umidade e sujeita à ocorrência de infiltrações.

A Figura 66 ilustra a vista geral do Módulo 1 e a Figura 67 ilustra o aspecto geral da impermeabilização do local.

Figura 66 - Vista geral do Módulo 1 do decantador.



Fonte: autora.

Figura 67 - Vista geral da Parede A. Nota-se a deficiência do sistema de impermeabilização por toda a sua extensão.



Fonte: autora.

Nota-se também a presença de fissuras na estrutura, conforme ilustra a Figura 68 a Figura 71. As fissuras são oriundas da retração do concreto, e foram agravadas pela incidência contínua de água no material com o passar do tempo, devido a ineficácia do sistema impermeabilizante.

Figura 68 – Fissura de retração na parede A.



Fonte: autora.

Figura 69 – Aproximações da Figura 68, evidenciando fissura.



Fonte: autora.

Figura 70 - Fissura de retração na Parede C.



Fonte: autora.

Figura 71 - Fissura de retração na Parede C.



Fonte: autora.

Ademais, constatou-se o processo erosão do concreto por abrasão, principalmente nas canaletas passantes no meio do decantador e na base dos pilares de suporte das cortinas de difusão. As Figura 72 a Figura 74 ilustram a anomalia citada.

Conforme se observa nas imagens, esta anomalia se concentra no fundo do decantador, onde ficam concentradas as partículas sólidas presentes na água, que são escoadas constantemente nos processos de limpeza do decantador.

Figura 72 – Pilar executado de sustentação da cortina de difusão com sinais de abrasão.



Fonte: autora.

Figura 73 – Aspecto do piso com abrasão.



Fonte: autora.

Figura 74 – Aspecto da canaleta com erosão acentuada devido a abrasão.



Fonte: autora.

6.1.3.2. Módulo 2

Assim como nas demais etapas de tratamento da Estação, no Módulo 2 de decantação também foi observada a deterioração do sistema de impermeabilização. Devido a este motivo, a estrutura de concreto armado ficou exposta à umidade e sujeita a ocorrência de infiltrações e erosões superficiais por abrasão.

A Figura 75 ilustra a vista geral do Módulo 2 e a Figura 76 a Figura 78 ilustram o aspecto geral da impermeabilização do local.

Figura 75 - Vista geral do Módulo 2 do decantador.



Fonte: autora.

Figura 76 - Aspecto geral da impermeabilização na Parede A. Nota-se a proliferação de microrganismos e a deficiência desse sistema por toda a sua extensão.



Fonte: autora.

Figura 77 - Aspecto geral da impermeabilização da Parede D. Nota-se que esta apresenta-se deficiente por toda a extensão da parede.



Fonte: autora.

Figura 78 - Aspecto geral da impermeabilização da laje de fundo. Nota-se que esta apresenta-se deficiente por toda a extensão da superfície.



Fonte: autora.

Foram observadas também as mesmas fissuras mencionadas anteriormente no capítulo 6.1.3.1, ocasionadas pela retração do concreto, e sendo agravadas pela percolação de água devido a fragilidade do sistema impermeabilizante, conforme ilustra a Figura 79.

Figura 79 – Fissura de 1,8 mm na Parede A.



Fonte: autora.

6.1.4. Filtro

A parte interna do filtro não foi analisada devido à impossibilidade de se efetuar seu esvaziamento sem comprometer o fornecimento de água. Portanto, foi verificada somente sua área externa. A Figura 80 ilustra a vista superior dos filtros.

Figura 80 – Vista superior dos filtros da ETA.



Fonte: autora.

Conforme ilustra a Figura 81 e a Figura 82, a membrana de impermeabilização do filtro encontra-se descolada em diversas regiões, expondo a estrutura de concreto armado à ação deletéria da água

Figura 81 - Descolamento da membrana impermeabilizante do filtro.



Fonte: autora.

Figura 82 – Descolamento da membrana impermeabilizante no interior do filtro.



Fonte: autora.

6.1.5. Área externa

Na área externa das instalações da ETA também foram constatadas diversas manifestações patológicas, oriundas dos danos observados no interior dos módulos, bem como devido à falta de manutenção dos elementos. A Figura 83 ilustra a vista geral da área externa.

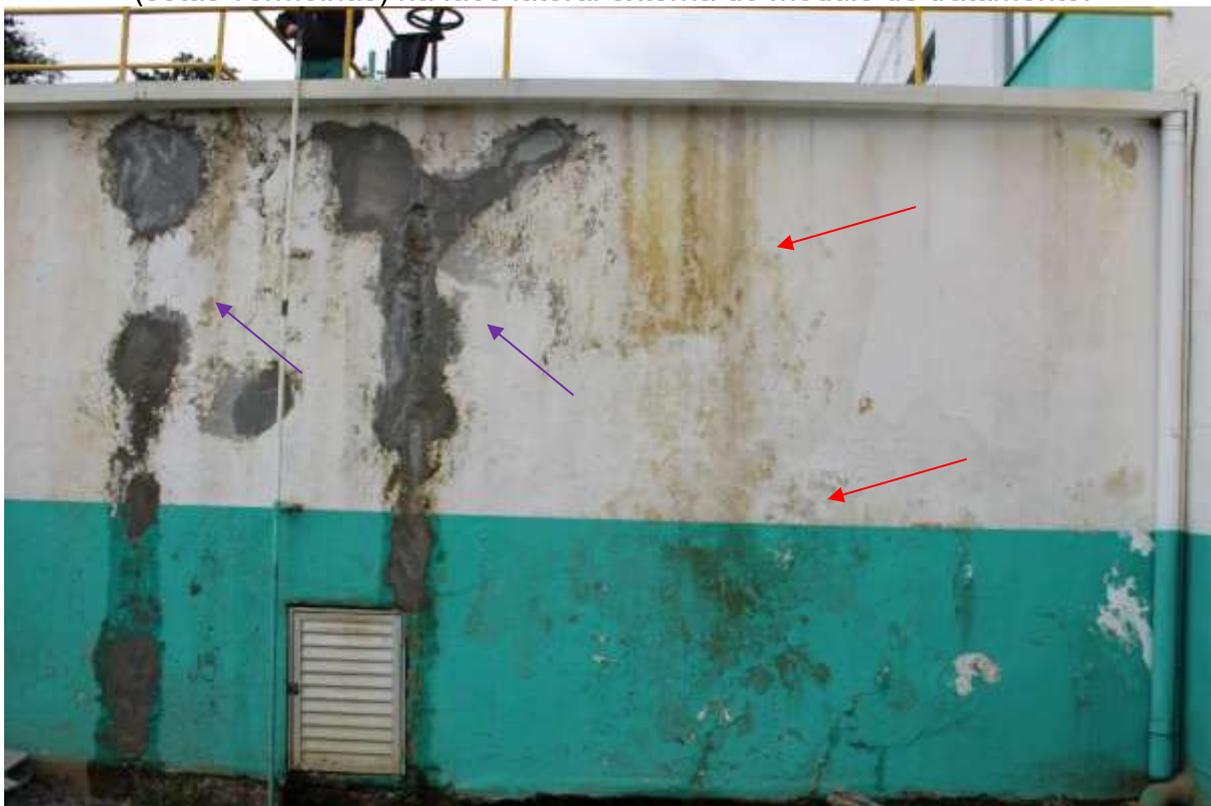
Figura 83 - Vista geral da lateral externa do módulo principal de tratamento.



Fonte: autora.

Nas paredes externas da região dos filtros foram observados diversos locais onde ocorreu infiltração de água na estrutura por falhas na impermeabilização do módulo de tratamento. Foram realizados tratamentos paliativos na localidade utilizando cimento de pega ultrarrápida, porém, este tratamento não soluciona a origem do problema. A Figura 84 ilustra a anomalia citada.

Figura 84 – Locais com infiltrações acentuadas (setas roxas), manchas de umidade (setas vermelhas) na face lateral externa do módulo de tratamento.



Fonte: autora.

Como estes reparos não solucionaram as falhas de impermeabilização, continuaram a ocorrer infiltrações, ocasionando também a lixiviação do material, conforme se observa na Figura 85.

Figura 85 – Manchas brancas (eflorescências) devido à lixiviação do concreto na região onde foi efetuado reparo com cimento de pega ultrarrápida.



Fonte: autora.

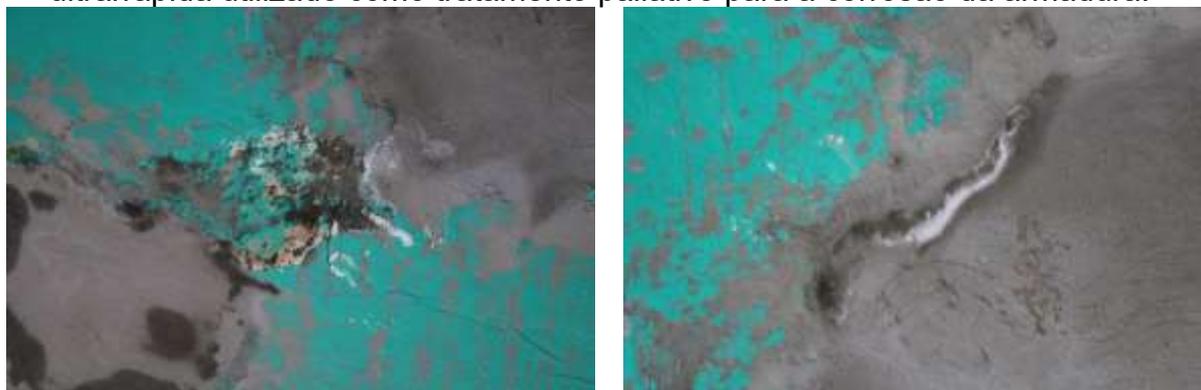
A mesma anomalia foi observada nas demais paredes da estação, conforme é possível observar na Figura 86 a Figura 89.

Figura 86 – Reparos efetuados em regiões que apresentaram sinais de infiltração.



Fonte: autora.

Figura 87 – Aproximações da Figura 86. Infiltrações e manchas esbranquiçadas (eflorescências) devido à lixiviação dos sais solúveis presentes no cimento de pega ultrarrápida utilizado como tratamento paliativo para a corrosão da armadura.



Fonte: autora.

Figura 88 – Manchas esbranquiçadas (eflorescências) devido à lixiviação dos sais solúveis presentes no cimento de pega ultrarrápida utilizado como tratamento paliativo para infiltrações.



Fonte: autora.

Figura 89 – Tratamento paliativo em área com infiltrações.



Fonte: autora.

Está ocorrendo também a erosão do solo abaixo da estrutura do filtro, pela percolação constante de água, conforme é possível observar na Figura 90. A água responsável pela erosão advém de infiltrações na região entre os decantadores e os filtros, e de tubulações do sistema de drenagem pluvial que se encontram rompidas na localidade.

Figura 90 – Erosão do solo devido à incidência de água no local através de infiltrações na região entre filtros e decantadores e através de tubulações do sistema de drenagem pluvial danificadas.



Fonte: autora.

Ademais, nota-se o desenvolvimento de manchas de umidade em diversas regiões da estação, bem como a utilização de cimento de pega ultrarrápida em diversos pontos como tratamento paliativo para as falhas de estanqueidade, não solucionando, portanto, a origem do problema. As Figura 91 a Figura 93 ilustram os danos descritos anteriormente.

Figura 91 – Manchas de umidade e tentativa de reparação em focos de infiltração na região dos fundos do módulo de tratamento.



Fonte: autora.

Figura 92 – Regiões com infiltrações e reparos paliativos com cimento de pega ultrarrápida.



Fonte: autora.

Figura 93 – Manchas de umidade (vermelho) e reparos paliativos efetuados em regiões com infiltrações (amarelo).



Fonte: autora.

6.1.6. Outros ambientes

6.1.6.1. Galeria das tubulações

Abaixo da galeria de manobras e atrás dos módulos de tratamento encontra-se a galeria das tubulações. A Figura 94 apresenta as vistas gerais do ambiente.

Figura 94 – Vistas gerais da galeria de tubulações.



Fonte: autora.

No local, foram identificadas manifestações patológicas com origem associada à umidade, principalmente na parede dos fundos. Esta parede faz divisa com os filtros que, conforme citado anteriormente no Capítulo 6.1.4, apresenta falhas no seu sistema de impermeabilização, permitindo a infiltração de água através do concreto.

Devido a este motivo, nota-se a presença de diversas manchas de umidade, empolamento e descolamento da pintura nas paredes, conforme ilustra a Figura 95 e a Figura 96.

Figura 95 – Manchas de umidade e o empolamento e descolamento da pintura por toda a extensão da parede dos fundos do cômodo.



Fonte: autora.

Figura 96 – Manchas de umidade e empolamento e descolamento da pintura na parede dos fundos da galeria de tubulações.



Fonte: autora.

Devido à umidade excessiva no ambiente e a falta de manutenção, está ocorrendo também a corrosão das tubulações e das suas estruturas metálicas de suporte, conforme ilustra a Figura 97 e a Figura 98.

Figura 97 – Corrosão dos elementos metálicos de suporte às tubulações.



Fonte: autora.

Figura 98 – Corrosão da tubulação metálica.



Fonte: autora.

As infiltrações na parede ocasionaram também o desenvolvimento de manchas esbranquiçadas (eflorescências) devido à lixiviação do concreto, conforme ilustra a Figura 99 e a Figura 100.

Figura 99 – Acúmulo de carbonato de cálcio devido a lixiviação do concreto.



Fonte: autora.

Figura 100 - Aproximações da Figura 99, evidenciando depósito de carbonato de cálcio.



Fonte: autora.

Nas paredes também foram constatadas fissuras de origem higroscópica, ocasionadas pela incidência de umidade no revestimento. A Figura 101 a Figura 102 ilustram a anomalia citada.

Figura 101 – Fissuras de origem higroscópica.



Fonte: autora.

Figura 102 – Aproximações da Figura 101, evidenciando fissuras.



Fonte: autora.

6.1.6.2. Depósito

Entre os dois módulos de flocladores há um depósito, com acesso através da área externa, conforme ilustra a Figura 103.

Figura 103 – Vista geral do depósito.



Fonte: autora.

Devido a falhas na impermeabilização dos flocladores, estão ocorrendo infiltrações no ambiente, resultando no desenvolvimento generalizado de manifestações patológicas associas à umidade. Além disso, o ambiente não possui ventilação adequada, favorecendo ainda mais a incidência destes danos.

Nota-se a presença de manchas de umidade, a proliferação de microrganismos em polimento e descolamento da pintura por toda a extensão das paredes e teto do ambiente, conforme ilustra a Figura 104 e a Figura 105. O ambiente encontra-se em estado completamente insalubre, inviabilizando a sua utilização pelos colaboradores responsáveis pelos serviços de manutenção no local.

Figura 104 - Manchas de umidade, proliferação de microrganismos e empolamento e descolamento da pintura por toda a extensão das paredes e teto do depósito.



Fonte: autora.

Figura 105 – Manchas de umidade, proliferação de microrganismos e empolamento e descolamento da pintura por toda a extensão das paredes e teto do depósito.



Fonte: autora.

Nota-se também a lixiviação do concreto e do revestimento argamassado, conforme ilustra a Figura 106.

Figura 106 – Lixiviação do revestimento argamassado, evidenciado pela presença de estalactites.

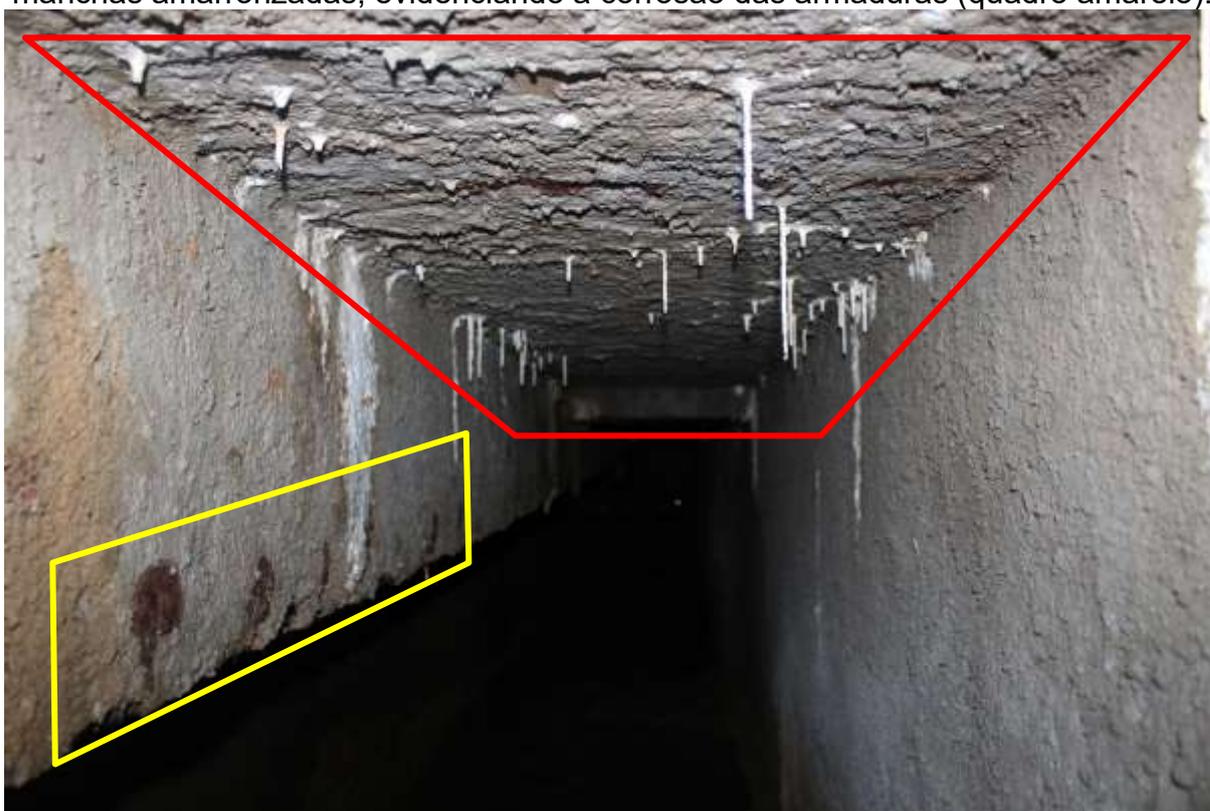


Fonte: autora.

6.1.6.3. Caixaão perdido

Abaixo da região situada entre os decantadores e o filtro há uma área de caixaão perdido. No local, estão ocorrendo infiltrações devido a falhas na impermeabilização dos módulos de tratamento, resultando na lixiviação do concreto, evidenciada pelo desenvolvimento de estalactites, conforme ilustra a Figura 107 e a Figura 108. Nota-se também indícios de corrosão na armadura no local.

Figura 107 – Estalactites devido à lixiviação do concreto (quadro vermelho) e manchas amarronzadas, evidenciando a corrosão das armaduras (quadro amarelo).



Fonte: autora.

Figura 108 – Acúmulo de carbonato de cálcio na superfície devido à lixiviação do concreto (seta vermelha), e exposição e corrosão da armadura (seta amarela).



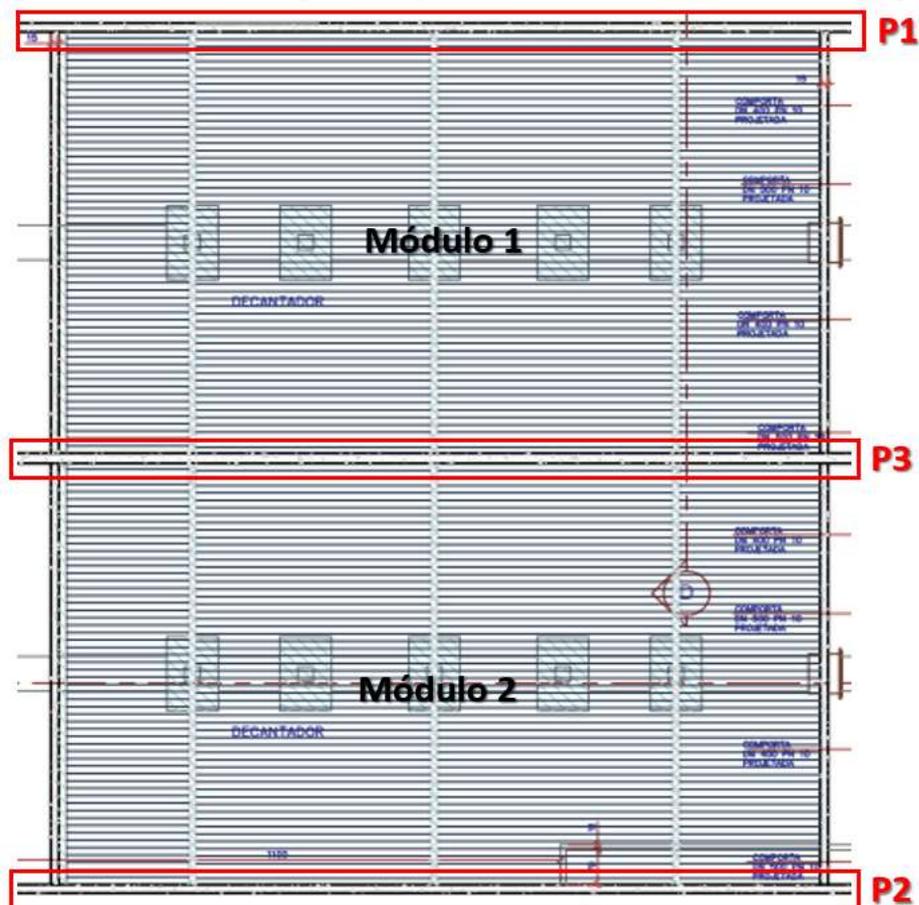
Fonte: autora.

6.2. RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA

6.2.1. Mapeamento das armaduras (pacometria)

Foram mapeadas as armaduras das paredes internas e externas dos módulos de decantação, e os resultados obtidos são apresentados no Quadro 1. As paredes foram identificadas conforme a Figura 109.

Figura 109 - Identificação das paredes dos módulos de decantação.



Fonte: autora.

Quadro 1 – Resultado obtido pela pacometria nas paredes de concreto dos módulos de decantação

PAREDES DE CONCRETO	DESCRIÇÃO	
P1	Região tracionada (ambiente interno)	Malha de aço com espaçamento de aproximadamente 10 x 10 cm com Ø12.5mm
	Face comprimida (ambiente externo)	Malha de aço com espaçamento de aproximadamente 20 x 20 cm com Ø12.5mm
P2	Face tracionada (ambiente interno)	Malha de aço com espaçamento de aproximadamente 10 x 10 cm com Ø12.5mm
	Face comprimida (ambiente externo)	Malha de aço com espaçamento de aproximadamente 20 x 20 cm com Ø12.5mm
P3	Ambas as faces	Malha de aço com espaçamento de aproximadamente 10 x 10 cm com Ø12.5mm

Conforme observado pelo ensaio, o espaçamento entre as barras é pequeno, inviabilizando a extração de corpos de prova com as dimensões usuais de 150 x 300 mm, motivo pelo qual se optou pela extração de minitestemunhos.

Também foi feita a aferição do cobrimento de concreto nesta etapa, que correspondeu a 50 mm, valor condizente com a CAA do ambiente, de acordo com a NBR 6118:2014.

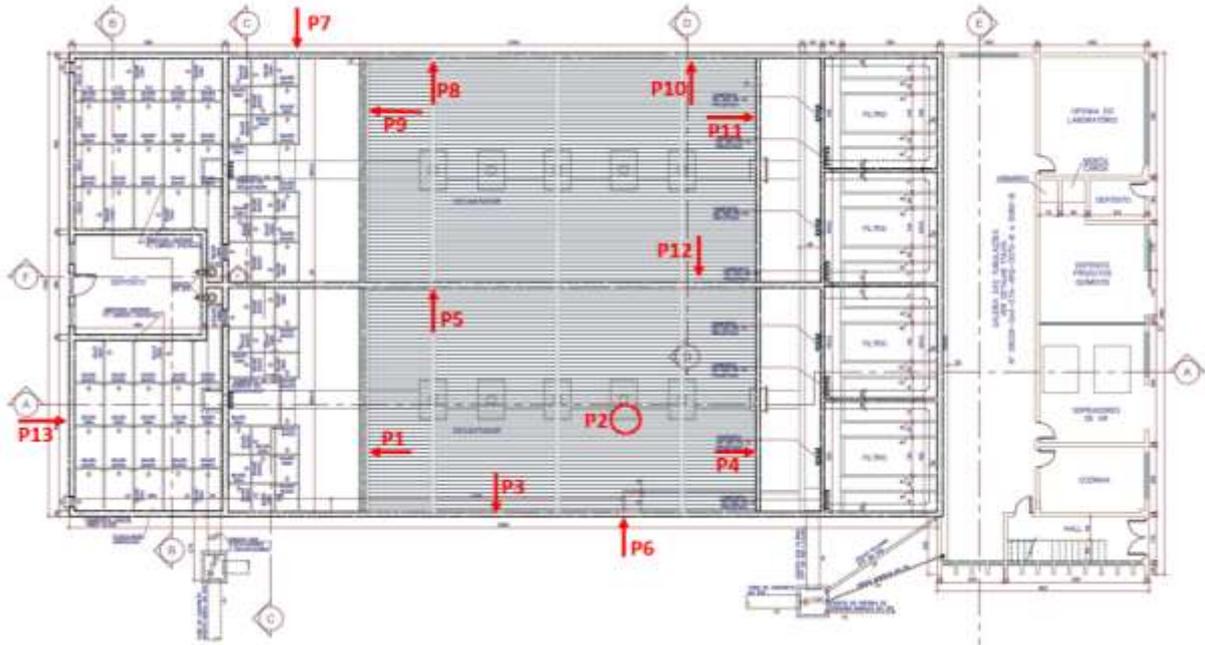
6.2.2. Ensaio de esclerometria

Conforme citado na metodologia deste trabalho, o ensaio de esclerometria é efetuado em diversos pontos, sendo parte deles em elementos comuns aos pontos de extração de corpos de prova. Desta forma, efetua-se um comparativo entre os valores de fck obtidos através dos índices esclerométricos e dos valores obtidos no rompimento em laboratório. O ensaio de esclerometria é complementar, utilizado para estimar o fck de regiões onde não é possível efetuar a extração de testemunhos, porém não pode ser conclusivo se realizado sozinho.

As medições obtidas na ocasião da vistoria para as paredes de concreto armado do módulo principal de tratamento estão apresentadas na Tabela 3 e na Tabela 4. A localização dos pontos ensaiados é apresentada na Figura 110.

Os pontos P1 a P5 e os pontos P8 a P12 foram ensaiados em superfície úmida, e os demais pontos em superfícies secas.

Figura 110 - Indicação da localização dos pontos onde foi efetuado ensaio de esclerometria.



Fonte: autora.

Tabela 3 - Valores medidos do rebote R nas paredes ensaiadas (1/2).

PONTO 1 (P1)				PONTO 2 (P2)			
25	29	35	33	<10	12	17	16
27	35	30	22	17	16	15	22
24	42	20	22	18	16,5	10	20
24	33	34	22	17,5	17	19	18
PONTO 3 (P3)				PONTO 4 (P4)			
29	36	25	30	16	32	19	17
34	28,5	28	32	22	22	16	18
28	28,5	28,5	28	16	20	24	55
22	26	29	36	14	18	24	28
PONTO 5 (P5)				PONTO 6 (P6)			
22	32	30	37	32	30	32	30
29	29	32	24	35	36	36	37
27	27	32	26	25	28	30	32
30	33	33	22	28	30	32	32
PONTO 7 (P7)				PONTO 8 (P8)			
28	32	38	24	25	30	30	32
29	32	34	28	25	18	28	24
28	28	32	32	28	16	22	22
24	28	32	38	28	28	32	18

Tabela 4 - Valores medidos do rebote R nas paredes ensaiadas (2/2)

PONTO 9 (P9)				PONTO 10 (P10)			
18	24	24	18	20	22	18	18
19	22	18	25	22	20	22	20
16	28	18	16	28	18	28	22
22	22	18	16	25	24	24	28
PONTO 11 (P11)				PONTO 12 (P12)			
22	18	18	16	28	26	28	29
22	14	18	14	28	26	16	26
14	14	18	16	30	20	30	31
16	20	16	16	30	30	26	26
PONTO 13 (P13)							
	36	42	38	40			
	24	34	40	36			
	30	38	34	40			
	30	34	36	40			

Após análise dos resultados, os pontos P1, P2, P4, P8, P9 e P11 foram descartados, uma vez que não atendem ao critério de discrepância máxima de 10% com relação à média dos valores aproveitados, ou possuíram ao menos cinco leituras válidas para o cálculo. Desta forma, calculou-se os valores de resistência (f_{ck}) para os demais pontos através do ábaco da Figura 25.

A NBR 7584:2012 traz ainda que para superfície úmidas, no concreto estrutural, o índice esclerométrico pode indicar valores de resistência até 20% inferiores àqueles indicados para o concreto seco equivalente. Devido à isso, foram efetuadas correções nos valores de resistência das superfícies úmidas, acrescentando 15% no valor da sua média.

Como o aparelho apresenta ábaco de conversão apenas para corpos cilíndricos de dimensões 150x300 mm, multiplica-se os valores obtidos pelo coeficiente de forma apropriado. O Quadro 2 apresenta os valores de coeficientes de forma para diferentes dimensões de corpos cilíndricos, dados pelo fabricante do aparelho.

Quadro 2 - Coeficientes de forma dados pelo fabricante.

COEFICIENTES DE FORMA			
Cilindro	Φ 150x300mm	Φ 100x200mm	Φ 200x200mm
Coeficiente de forma	1,0	1,06	1,19

Como foi extraído um corpo de prova cilíndrico de dimensões 75x150 mm, e 4 testemunhos de dimensões 50x75 mm, utilizou-se as dimensões dadas pelo fabricante mais próximas da experimental, ou seja, Φ 100x200 mm, resultando em um coeficiente de forma de 1,06. Com o coeficiente foram calculados os valores finais de fck, apresentados abaixo no Quadro 3, juntamente com os valores médios do ensaio de esclerometria após tratamento de dados.

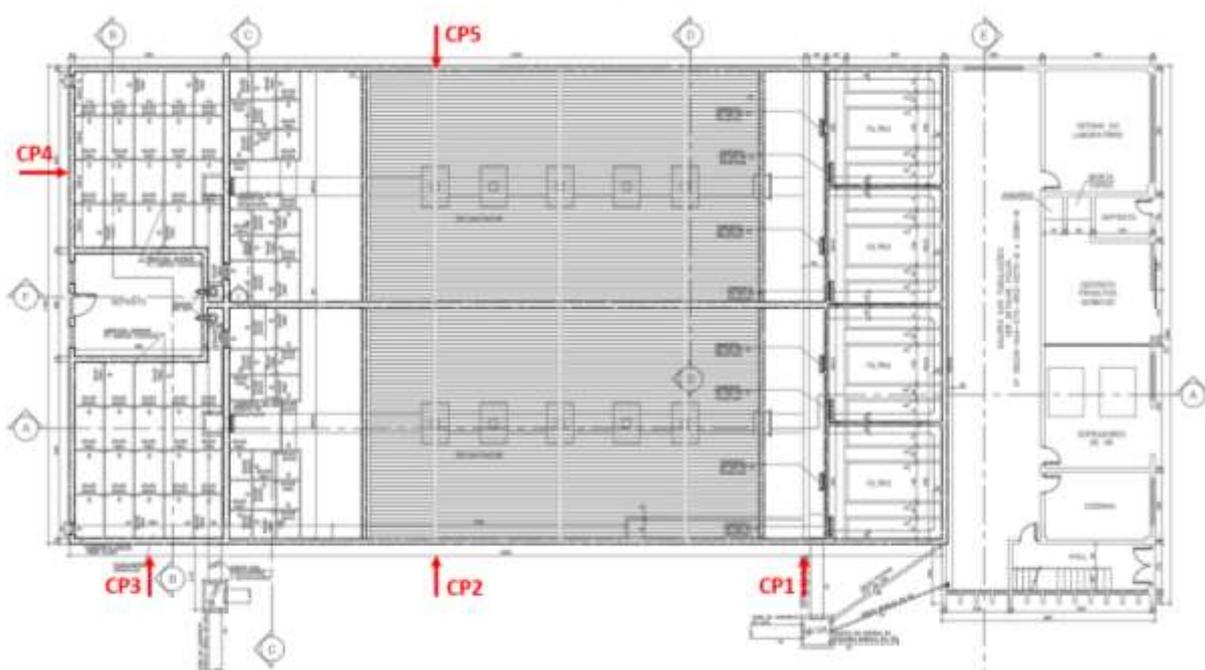
Quadro 3 – Resultados obtidos pelo Ábaco do fabricante, e pelas correções recomendadas pela NBR 7584:2012.

RESULTADOS PAREDES DE CONCRETO ARMADO					
Elemento	Média	fck (N/mm²)	fck corrigido – fator de forma (N/mm²)	fck corrigido – umidade (N/mm²)	Dispersão (N/mm²)
P3	28,6	19,0	20,1	23,2	±5,3
P5	28,3	18,5	19,6	22,5	±5,3
P6	30,6	22,0	23,3	23,3	±5,6
P7	29,9	21,0	22,3	22,3	±5,6
P10	22,7	11,0	11,9	13,6	±4,2
P12	27,0	17,0	18,0	20,7	±5,0
P13	36,9	30,0	31,8	31,8	±6,0

6.2.1. Determinação da resistência utilizando testemunhos

Conforme citado na metodologia, foram realizadas 5 (cinco) extrações de testemunhos nas paredes da estrutura do módulo principal de tratamento do objeto de estudo. A localização dos pontos de extração é representada a seguir na Figura 111.

Figura 111 - Indicação da localização dos pontos onde foram extraídos os testemunhos.



Fonte: autora.

Os resultados obtidos por meio do rompimento dos testemunhos estão sintetizados no Quadro 4.

Quadro 4 – Resultados da resistência à compressão dos testemunhos de concreto.

Testemunho	Resistência constatada (MPa)
CP1	31,6
CP2	43,2
CP3	50,7
CP4	40,9
CP5	28,9

6.2.2. Ensaio de carbonatação

Por meio da avaliação das frentes de carbonatação, nota-se que não houve carbonatações significativas nos testemunhos extraídos, sendo constatada em apenas uma das amostras extraídas das paredes uma frente de carbonatação de aproximadamente 2,7 cm, e sendo o cobrimento das armaduras, medido in loco, de 5,0 cm.

O resultado do ensaio é apresentado a seguir na Figura 112 a Figura 116.

Figura 112 – Resultado de ensaio de carbonatação no CP1 indicando concreto sadio (Rosa púrpura), a região carbonatada trata-se de revestimento argamassado.



Fonte: autora.

Figura 113 - Resultado de ensaio de carbonatação no CP indicando em sua grande maioria concreto sadio (rosa púrpura), presença de aproximadamente 2,7 cm de frente de carbonatação.



Fonte: autora.

Figura 114 – Aferição da frente de carbonatação. Resultado obtido: 2,7 cm.



Fonte: autora.

Figura 115 – Resultado de ensaio de carbonatação no CP3 indicando a presença de um concreto sadio. Ressalta-se que na região incolor foi aplicado o nitrato de prata, por isso a diferença de coloração.



Fonte: autora.

Figura 116 - Resultado de ensaio de carbonatação no CP4 indicando concreto sadio (rosa púrpura).



Fonte: autora.

6.2.2.1. *Predição de vida útil*

Conforme o modelo matemático criado por TUUTTI, é possível se obter uma estimativa de tempo até que a carbonatação avance até a armadura e inicie seu processo de degradação, que se caracteriza pela despassivação da armadura devido a alteração do pH do concreto e sua consequente corrosão.

Como o CP 2 foi o único testemunho que apresentou indícios de carbonatação no concreto, este será utilizado como base para os cálculos.

O avanço da carbonatação é calculado pela equação $X = k\sqrt{t}$, onde:

X é a profundidade de carbonatação = 27 mm para o CP 2;

t é o tempo de exposição em anos = 51 anos (idade da ETA);

k é o coeficiente de carbonatação = a ser calculado

Dessa forma, temos:

$$X = k\sqrt{t}$$

$$27 = k\sqrt{51}$$

$$27 = k * 7,14$$

$$k = 3,78 \text{ mm/ano}^{1/2}$$

Dessa forma, calcula-se em quanto tempo a frente de carbonatação levará para atingir a armadura na estrutura, cujo cobrimento é de 50 mm:

$$X = k\sqrt{t}$$

$$50 = 3,78\sqrt{t}$$

$$50/3,78 = \sqrt{t}$$

$$t \cong 175 \text{ anos}$$

Logo, como a estrutura já possui 51 anos, levará cerca de 124 anos para que a frente de carbonatação alcance a armadura.

Essa determinação e estimativa do processo de carbonatação foi realizado com objetivo de ilustrar o potencial da medida de carbonatação como estimativa da vida útil das estruturas de concreto. Naturalmente, por se referir a uma determinação apenas, esse resultado tem um efeito praticamente qualitativo, indicando que a frente de carbonatação não foi o principal causador da despassivação e corrosão das armaduras.

6.2.2.2. Correções do ensaio de esclerometria devido à carbonatação

Como a carbonatação afeta a dureza superficial do concreto, os valores obtidos no ensaio podem não condizer com a realidade da estrutura em regiões carbonatadas.

A NBR 7584:2012 aponta que a carbonatação pode influenciar em até 50% no valor da resistência estimada para o concreto. Dessa forma, de modo a minimizar as discrepâncias e obter um valor mais semelhante à resistência real do concreto, foram efetuadas correções de 20% nos valores de f_{ck} estimados para as áreas de ensaio

situadas nos ambientes externos, uma vez que as áreas internas não estão sujeitas à ação da carbonatação pelo fato do concreto permanecer sempre saturado.

Os pontos corrigidos foram o P6, P7 e P13, e os novos valores de fck são apresentados abaixo no Quadro 5.

Quadro 5 - Correção do fck estimado do concreto no ensaio de esclerometria devido a influência da carbonatação.

Elemento	fck estimado (N/mm ²)	fck corrigido – carbonatação (N/mm ²)	Dispersão (N/mm ²)
P6	23,3	18,6	±5,6
P7	22,3	17,8	±5,6
P13	31,8	25,4	±6,0

6.2.3. Ensaio de determinação da presença de íons cloreto

Semelhante ao ensaio de carbonatação, foi realizada a aplicação do Nitrato de Prata (AgNO₃) nos testemunhos extraídos para rompimento em laboratório para determinação da presença de íons cloreto, agente agressor capaz de destruir a camada passivadora das armaduras, tornando-as suscetíveis a corrosão.

Não foram encontrados quaisquer sinais da presença de íons cloreto nos testemunhos analisados. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 117 e na Figura 118.

Figura 117 - Resultado de ensaio de íons cloreto no CP 3, indicando concreto sadio (incolor).



Fonte: autora.

Figura 118 - Resultado de ensaio de íons cloreto no CP 4, indicando concreto sadio (incolor).



Fonte: autora.

6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os valores de fck obtidos através do rompimento dos testemunhos em laboratório e comparando com os valores de fck estimados através do ensaio de esclerometria, nos pontos coincidentes com as extrações, nota-se que os resultados são similares. Logo, tem-se uma maior confiabilidade nos resultados obtidos através da esclerometria, podendo as resistências estimadas serem utilizadas como base para futuras análises estruturais.

Conforme observado no ensaio de determinação da presença de íons cloreto no concreto, nota-se que não há a presença deste agente agressivo em nenhum dos testemunhos analisados. Dessa forma, não haverá o desencadeamento de processos de corrosão da armadura por conta destes elementos, que costumam ser mais rápidos e agressivos do que em processos de carbonatação.

Através da determinação da profundidade de carbonatação observa-se que apenas um dos testemunhos testados apresentou espessura carbonatada significativa. A carbonatação por si só é um processo de degradação das estruturas que ocorre de maneira lenta e, além disso, a carbonatação não ocorre em concretos saturados, estado no qual se encontram as estruturas devido às falhas na impermeabilização dos módulos de tratamento. Ademais, no testemunho carbonatado nota-se um grande cobrimento de concreto, fazendo com que a frente de carbonatação demore ainda mais para atingir a armadura.

Apesar disso, como foi identificada esta manifestação patológica em um dos corpos de prova extraídos, o ideal é que este ensaio seja feito novamente em mais regiões da ETA, de modo a se constatar com mais certeza que a estrutura está fora de risco quanto a este fator de degradação.

Salienta-se, ainda, que foram constatados diversos pontos onde está ocorrendo a lixiviação do concreto, fator determinante para aumento da sua porosidade, o que também facilita o avanço da frente de carbonatação. Dessa forma, é necessário a recuperação das anomalias observadas nas estruturas, de modo a preservar a integridade das armaduras.

6.4. RECOMENDAÇÕES

De modo a preservar a estrutura e estender ao máximo sua vida útil, é necessário que sejam efetuadas as reparações de todas as manifestações patológicas identificadas na ETA.

Como a origem da maioria dos danos constatados se deu pela deterioração do sistema de impermeabilização no interior dos módulos de tratamento, este é o primeiro elemento que deve ser reparado, caso contrário, as demais anomalias podem tornar a ocorrer. No entanto, para garantir uma superfície regular para aplicação da impermeabilização, deve-se primeiro efetuar a recuperação das fissuras presentes nas faces internas dos módulos de tratamento.

Por se tratar de uma estação de tratamento de água, deve ser escolhido um impermeabilizante próprio para estas estruturas, de modo que este deve ser resistente ao ataque dos agentes agressivos utilizados no tratamento, como o cloro. Além disso, o produto escolhido deve ser tal que não possua em sua composição agentes que possam vir a contaminar a água tratada.

Outro fator determinante para a escolha do material, é o fato de não haver a possibilidade de cessar completamente o tratamento da água, ou seja, somente um dos módulos pode ser fechado por vez. Desta forma, as paredes de concreto situadas entre módulos distintos estarão sempre na condição saturada e estarão sobre a ação de pressão negativa da água.

Dessa forma, para os módulos de tratamento, recomenda-se impermeabilização por meio de tratamento químico com argamassa cristalizante, que, quando aplicada sobre o concreto, suas substâncias químicas ativas penetram profundamente e reagem com os subprodutos da hidratação do cimento, causando uma reação catalítica. Esta reação gera uma formação cristalina insolúvel nos poros e capilaridades do concreto, tornando-o permanentemente selado contra a penetração da água e substâncias agressivas de qualquer direção. Este tipo de impermeabilização também pode ser aplicado sobre as superfícies saturadas, bem como em estruturas sujeitas à pressão negativa.

Nas passarelas situadas acima dos módulos, deve-se também ser efetuado novo sistema de impermeabilização, porém, como há corrosão de armadura nas áreas a serem impermeabilizadas, deve-se primeiramente efetuar a recuperação desta

manifestação patológica. Após, seguir com a impermeabilização das passarelas com membrana à base de poliuretano aromático, bicomponente, isento de solventes, à base de resina vegetal. Este impermeabilizante possui resistência ao vapor de água, característica essencial, já que a estrutura se situa acima dos módulos. A mesma membrana pode ser utilizada para a impermeabilização das canaletas de água bruta.

Após recuperados os sistemas de impermeabilização, serão solucionadas as falhas de estanqueidade que estão permitindo a infiltração de água nos elementos estruturais, e ocasionando as manifestações patológicas observadas no ambiente externo.

Pode-se então efetuar a recuperação das manchas de umidade e proliferação de microrganismos, realizando lavagem com hidrojateamento e solução de hipoclorito de sódio. Posteriormente, efetuar a recuperação das corrosões de armadura e das fissuras observadas nestes ambientes. Nos pontos onde foi observada a carbonatação do concreto, deve efetuar a realcalinização do material, que consiste no restabelecimento da alcalinidade do concreto através da elevação do seu pH. Por fim, finalizar com uma nova pintura todo o ambiente externo.

Recomenda-se, ainda, que seja efetuado um plano de manutenção continuada para a ETA, contendo todos os serviços de manutenção preventiva e controle de sua periodicidade, evitando que a deterioração dos elementos ocorra novamente, fazendo com que sejam necessárias correções de elevado custo nos elementos estruturais.

7. CONCLUSÃO

Apesar de os ensaios não apresentarem resultados muito negativos, levando em consideração os conceitos de durabilidade e vida útil e os resultados verificados através das inspeções visuais e pesquisas bibliográficas, conclui-se que a estrutura em seu atual estado atingiu o fim de sua vida útil. Isto pois em diversas regiões já ocorreu o processo de despassivação das armaduras, desencadeando a sua corrosão. Porém, isto não significa que a estrutura se tornou obsoleta, uma vez que pode ser recuperada.

O principal agente de degradação responsável pela diminuição da durabilidade da estrutura foi a água, infiltrada no concreto através de falhas gerais na impermeabilização dos módulos de tratamento. A corrosão da armadura ocorre em meio aquoso por reações eletroquímicas de oxirredução.

As estruturas da ETA de maneira geral apresentam elevado grau de deterioração. Além da corrosão das armaduras, as demais manifestações patológicas observadas, em sua maioria, também foram ocasionadas pela exposição constante das estruturas de concreto armado à umidade. Isto porque não foram efetuados quaisquer tipos de manutenções no sistema de impermeabilização dos módulos de tratamento, resultando no seu desgaste e conseqüente falha de estanqueidade.

Além disso, foram efetuados reparos paliativos para as manifestações patológicas observadas, o que não resolve de fato a origem do problema, resultando assim em gastos desnecessários, que se repetirão com frequência com o reaparecimento das anomalias.

Como as estruturas apresentam danos generalizados, será necessário um elevado investimento para sua recuperação, bem como haverá interrupções no abastecimento de água, prejudicando significativamente a população da região. Logo, fica evidente a necessidade de um plano de manutenção e um controle rigoroso destes serviços, uma vez que a maioria dos danos poderiam ter sido evitados caso fossem efetuadas manutenções preventivas nas estruturas.

A manutenção prolonga a vida útil das construções, além de garantir a segurança das estruturas durante seu uso, sendo, portanto, de suma importância que estes serviços não sejam negligenciados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13752: Perícias de engenharia na construção civil**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5674: Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584 Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9575: Impermeabilização - Seleção e projeto**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ANDRADE, J.J.O. **Vida útil das estruturas de concreto**. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, cap. 31, p. 923-951.

ANGST, U. et al. **Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities - A critical review by RILEM TC 281-CCC**. Rilem Technical Letters, vol. 5, p. 85 – 100, 2020.

GRAHAM, J. R. et al. **Erosion of concrete in hydraulic structures**. American Concrete Institute. ACI 210R-93. 24p. 1998.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: USP. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993. 272 p.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993. 330 p.

MARCELLI, M. **Sinistros na Construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 2007. 270 p.

METROTOKYO INSTRUMENTOS DE PRECISÃO. **Esclerômetro - Durômetro Portátil para Concreto. Código: MTK-1015**. Manual de Instruções. Disponível em: <https://metrotokyo.com.br/arquivos/manual/durometros/manual-mtk-1015.pdf>. Acesso em out. 2022.

MONTEMOR, M.F. et al. **Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides**. Cement & Concrete Composites, v.24,2002 p.45-53.

NEUMANN JR, Cláudio. **Avaliação do processo de lixiviação em concreto massa – O caso de Itaipu Binacional**. 2019. 115 páginas. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019.

POLITO, G. **Principais sistemas de pinturas e suas patologias**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. Disponível em: <https://demc.ufmg.br/tec3/Apostila%20de%20pintura%20-%20Giulliano%20Polito.pdf> Acesso em out. 2022.

PRUNCKNER, F.; GJORV, O.E. **Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity**. Cement and Concrete Research, 2004. v. 34, 1209-1217.

ROSENQVIST, M.; PHAM, L. W.; TERZIC, A.; FRIDH, K.; HASSANZADEH, M. **Effects of interactions between leaching, frost action and abrasion on the surface deterioration of concrete**. Construction and Building Materials, v. 149, p. 849–860, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.137>>. Acesso em: 23 set 2022.

SALDANHA, M.S. **Painel – Inspeção Predial e Inspeção em Manutenção**. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias (COBREAP). Disponível em: http://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2015/11/Painel_InspecaoPredialInspecaoManutencao_Marcelo.pdf. Acesso em set de 2022.

Sindicato da Indústria da Construção do Estado do Pará (SINDUSCON - PA). **Manual de Garantias: NBR 5674:99**. 1ª ed. Belém, 2010

SALES, A. et al. **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2ª edição. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. 927 p.

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

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

VIEIRA FILHO, J. O. **Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos do broqueamento.** São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Engenharia de Construção Civil e Urbana, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC-EP-USP, 2007. 2 v. 440 p. (tese de doutorado). Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26102007-144854/pt-br.php>. Acesso em jul de 2022.

ANEXO A – PROJETOS ARQUITETÔNICOS DA ETA

