

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA,
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DAS
ESTRUTURAS DE CONCRETO DE ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

NAYARA GRACYELLE DIAS

D0181C18
GOIÂNIA
2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Nayara Gracyelle Dias

Título do trabalho: AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

3. Informações de acesso ao documento:

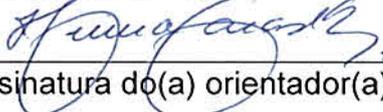
Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 05 / 02 / 2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

NAYARA GRACYELLE DIAS

**AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DAS
ESTRUTURAS DE CONCRETO DE ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Helena Carasek

Coorientador: Oswaldo Cascudo

D0181C18
GOIÂNIA
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Dias, Nayara Gracyelle
AVALIAÇÃO DA DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE
CONCRETO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO
[manuscrito] / Nayara Gracyelle Dias. - 2018.
XXIII, 203 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Helena Carasek; co-orientador Dr.
Oswaldo Cascudo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia,
2018.

Apêndice.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico,
tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Concreto. . 2. Estação de Tratamento de Esgoto.. 3. Manifestação
Patológica. . 4. Método de avaliação. . 5. Grau de deterioração.. I.
Carasek, Helena, orient. II. Título.

CDU 624



PPG
GECON

Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil



Ata de Nº 0181 da sessão de julgamento da Dissertação da aluna Nayara Gracyelle Dias da área de concentração Construção Civil do PPG em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Aos 23 dias do mês de julho de 2018, às 14h00, no Miniauditório do Centro de Recursos Computacionais (CERCOMP), da UFG, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada "Avaliação da Deterioração das Estruturas de Concreto de Estações de Tratamento de Esgoto", apresentada pela aluna **Nayara Gracyelle Dias**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Construção Civil. A Banca Examinadora foi presidida pela Prof.^a Dr.^a Helena Carasek (GECON/UFG), tendo como membros o Prof. Dr. Marcus André Siqueira Campos (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Antonio Eduardo Bezerra Cabral (UFG). Aberta a sessão pública, a candidata teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, a aluna foi arguida oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

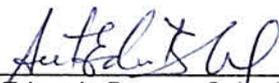
Membro	Instituição	Função	Resultado
Helena Carasek	GECON/UFG	Presidente	<u>APROVADA</u>
Marcus André Siqueira Campos	GECON/UFG	Examinador Interno	<u>APROVADA</u>
Antonio Eduardo Bezerra Cabral	UFG	Examinador Externo	<u>APROVADA</u>

() Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** da candidata **sem restrições**.

() Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** da candidata, conforme as seguintes justificativas:

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-Graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pela **candidata**.


 Marcus André Siqueira Campos
 PPG-GECON/UFG


 Antonio Eduardo Bezerra Cabral
 UFC


 Helena Carasek
 PPG-GECON/UFG

Candidata: Nayara Gracyelle Dias 

Dedico este trabalho aos meus pais, minhas irmãs e meu amado esposo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo que me proporciona, mesmo eu me sentindo indigna, por sua bondade e por cuidar de mim todos os dias.

À minha querida professora Helena Carasek por todo o aprendizado e por ter me iluminado nas trilhas da ciência desde a iniciação científica. Obrigada pela seriedade, competência e dedicação. Agradeço ainda pelas orientações e críticas construtivas e ainda pelo profissionalismo que também para mim foi um exemplo.

Ao professor Oswaldo Cascudo pelos ensinamentos e por estar sempre à disposição para contribuir com as discussões e enriquecimento deste trabalho.

À UFG por ter me aberto as portas ainda na graduação e por me capacitar para desenvolver minhas atribuições e competências no mercado de trabalho.

Agradeço ao GECON pela oportunidade do mestrado e pelos professores tão qualificados e também á equipe do LABITEC, Victor e Antônio, pela disponibilidade ímpar.

À CAPES, CNPq, FUNAPE e SANEAGO pelo financiamento para o desenvolvimento desta pesquisa.

À toda a equipe SANEAGO que me ajudou de forma direta e indireta para que esse trabalho fosse concluído. Agradeço à equipe da SUINT, SUMAR, E-GRH, e, em especial, agradeço à equipe da ETE Goiânia na pessoa de Luanna, Theyssa, Leandro, Felipe, Alair, Paulo, Jean's, Edson e Byanca e todos que contribuíram com a realização dos ensaios e com discussões a respeito do assunto da pesquisa.

Aos meus pais, por terem me desejado e me dado a vida, a eles todo o amor que não cabe em mim. Às minhas amadas irmãs, Pri e Dani, por serem duas pessoas maravilhosas e que me ensinam muito, a elas todo meu amor.

Agradeço a dois jovens grandes profissionais que me forneceram uma grande ajuda na reta final da dissertação com muita bondade e sem pedir nada em troca. Obrigada queridos Khristian e Marceles Filho por serem tão prestativos e dedicados.

Agradeço aos amigos Raquelzinha, Paulo e Fernando pela cumplicidade nestes dois anos, pelos momentos de desabafo e risadas, vocês serão sempre meus exemplos. Agradeço ainda aos amigos que me acompanharam de perto Camila, Marlon, Leandro e Luanna pelas discussões, críticas e contribuição.

Agradeço ao meu amado esposo, pela compreensão, amor e cuidado. Obrigada por estar ao meu lado todos os dias e me ensinar sobre dedicação e altruísmo. Amo você.

“A natureza pode suprir todas as necessidades do homem, menos a sua ganância.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

O ambiente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é classificado como um dos mais agressivos para o concreto. Estações com poucos anos de operação podem apresentar deterioração em níveis avançados, não somente ocasionada pela agressividade do meio, mas também pela especificação incorreta do concreto, com inobservâncias de prerrogativas normativas, e execução sem controle de qualidade adequado. Este trabalho tem como objetivo contribuir para avaliação do grau de deterioração de estruturas de concreto armado de ETEs e suas origens e causas. Neste contexto, a metodologia empregada envolveu a pesquisa experimental e estudo de caso. A pesquisa experimental abrangeu aspectos diagnósticos e de caracterização do concreto e do esgoto. O estudo de caso foi baseado na metodologia GDE/UnB (Grau de Deterioração das Estruturas de Concreto da Universidade de Brasília) adaptada para ETEs, que consiste numa avaliação do grau de deterioração das estruturas de concreto de forma a reduzir subjetividades. Foi estudada uma ETE do Estado de Goiás com tratamento do tipo Primário Quimicamente Assistido. Os aspectos operacionais da ETE mostraram que podem influenciar na deterioração das estruturas assim como as características do esgoto e especificações de projeto. Os ensaios diagnósticos no concreto, medida da espessura carbonatação, aspersão de nitrato de prata para avaliação de cloretos, esclerometria, pacometria, resistividade elétrica e extração de testemunho para avaliação em microscópio eletrônico de varredura, foram importantes para orientar e subsidiar a aplicação da metodologia GDE/UnB, embora os resultados de resistividade elétrica não tenham sido conclusivos. A ETE apresentou manifestações características conforme o processo de tratamento como, por exemplo, erosão no canal que conduz ao desarenador, corrosão das armaduras e desagregação do concreto no poço de sucção e no tanque de armazenagem de lodo. De forma geral, a ETE apresentou um grau de deterioração igual a 94 e, portanto, foi classificada com nível de deterioração alto, sendo necessária sua manutenção dentro do período de um ano. Essa manutenção poderá ser realizada por meio da priorização das unidades com seus respectivos GDE individuais, sendo que a primeira unidade a ser tratada, deverá ser o Tanque de Transição.

Palavras-Chave: Concreto. Estação de Tratamento de Esgoto. Manifestação Patológica. Método de avaliação. Grau de deterioração.

ABSTRACT

The environment of Wastewater Treatment Plants (WTP) is classified as one of the most aggressive for concrete. Plants with just a few years of operation may present deterioration in advanced levels, not only caused by the environment aggressivity, but also by the incorrect concrete specification with noncompliance of normative prerogatives and inadequate quality control during construction. The objective of this study is to contribute to the assessment of the degradation level of WTP's reinforced concrete structures, including the origin and causes of such deterioration. In this context, the methodology applied involved the accomplishment of a literature review, an experimental research and a case study. The experimental research included diagnostic aspects and the concrete's and sewer's characterization. The case study was based on the GDE/UnB methodology adapted to WTP which consists in the assessment of the level of deterioration of concrete structures in order to reduce subjectivities. A WTP in the State of Goias with Chemically Assisted Primary treatment was studied. The WTP' operational aspects showed they may influence in the deterioration of structures as well as the sewer's characteristics and project specifications. The diagnostic tests measurement of carbonation thickness, silver nitrate spray for chloride evaluation, sclerometry, pacometry, electrical resistivity and sample extraction for evaluation in scanning electron microscope, in the concrete were important to guide the application of the methodology, although the results of electrical resistivity were not conclusive. The WTP presented characteristic manifestations according to the treatment process, such as the erosion of the channel that conduct to the desander, corrosion and disaggregation in the suction well and in the sludge storage tank. In a general way, the WTP presented GDE equal to 94 and therefore was classified with a high level of deterioration, making its maintenance necessary within the period of one year. This maintenance may be performed through the prioritization of units with their respective GDE individuals, considering the first unit to be treated, according to the research, must be the Tank of Transition.

Keywords: Concrete. Wastewater Treatment Plants. Pathological manifestation. Assessment method. Deterioration level.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Características Físicas dos Esgotos consideradas por Metcalf e Eddy (2003).....	32
Figura 2.2– Distribuição percentual dos materiais sólidos presentes no esgoto adaptado de Von Sperling (2014)	34
Figura 2.3– Constituintes químicos inorgânicos de esgotos domésticos não tratados relacionados por Metcalf e Eddy (2003)	36
Figura 2.4– Constituintes químicos orgânicos de esgotos domésticos não tratados listados por Metcalf e Eddy (2003).....	39
Figura 2.5– Constituintes biológicos presentes em esgotos domésticos não tratados citados por Metcalf e Eddy (2003).....	40
Figura 2.6– Sequência do desenvolvimento sucessivo de espécies neutrofílicas e acidofílicas de <i>Thiobacillus</i> proposto por Shirakawa (1994)	42
Figura 2.7 –Sucessão ecológica da <i>Thiobacillus sp.</i> na superfície do concreto exposto ao sulfeto de hidrogênio	42
Figura 2.8– Manifestações Patológicas Típicas de Estações de Tratamento de Esgotos	45
Figura 2.9– Mecanismo de desgaste causado pela Erosão elencados por Aguiar (2012)	49
Figura 2.10– Representação da frente de carbonatação ao longo do tempo por Corsini (2013).	52
Figura 2.11– Mecanismo corrosão por cloretos ilustrado por Sadovski (2014).....	54
Figura 2.12– Mecanismo corrosão por ácidos biogênicos	56
Figura 2.13 - Alguns estudos desenvolvidos para avaliação da deterioração de estruturas de concreto armado	60
Figura 2.14– Fluxograma Metodologia GDE/UnB apresentado por Boldo (2002)	64
Figura 3.1– Configuração da disposição das unidades de tratamento na área da ETE H	71
Figura 3.2 – Disposição das unidades de tratamento existentes na ETE H.....	71
Figura 3.3– Ensaio e Parâmetros a serem avaliados no concreto das estruturas e no esgoto. 73	
Figura 3.4– Avaliação do Fator de Intensidade (Fi) referente ao “dano” carbonatação.	75
Figura 3.5– Realização do Ensaio de Carbonatação.....	76
Figura 3.6– Projeto estrutural das unidades de tratamento primário	77
Figura 3.7 – Detalhamento do projeto estrutural.....	78
Figura 3.8 – Parede CAP2 (PAR22) do Projeto Estrutural	78
Figura 3.9 – Localização das armaduras <i>in loco</i>	79
Figura 3.10 – Posicionamento do equipamento	79
Figura 3.11 – Extração do testemunho	79
Figura 3.12 – Local da extração do testemunho.....	79

Figura 3.13 – Comparação das espessuras carbonatadas com avaliação da frente de íons cloro por aspersão de nitrato de prata	81
Figura 3.14 – Esclerômetro Schmidt-Hammer	82
Figura 3.15 – Gráfico para conversão do Índice Esclerométrico em Resistência à Compressão	82
Figura 3.16 – Pacômetro Eletrônico	83
Figura 3.17 – Equipamento utilizado para determinação da resistividade elétrica do concreto	85
Figura 3.18 – Corpo de Prova extraído.....	86
Figura 3.19 – Localização da extração das amostras para análise no MEV	86
Figura 3.20 – Amostras para análise do MEV preparadas e armazenadas com sílica	86
Figura 3.21 – Laudo padrão de Resultados de Análise de Esgotos (SANEAGO, 2016)	91
Figura 3.22 – Sonda Eletromagnética para a medição de velocidade instantânea	93
Figura 3.23 – Pontos de Amostragem para Avaliação do Sulfato de Hidrogênio.....	94
Figura 4.1 – Vazão da ETE H em 2016 e 2017	104
Figura 4.2 – DBO e DQO do efluente da ETE H	106
Figura 4.3 – Sulfetos no esgoto doméstico tratado na ETE H.....	107
Figura 4.4 – Teor de Sulfeto, Temperatura e pH nos esgotos	108
Figura 4.5 – Gás Sulfídrico na atmosfera das Unidade de Tratamento da ETE H.....	109
Figura 4.6 – H ₂ S - Gás (mg/L) x Temperatura Ambiente	111
Figura 4.7 – Sulfetos (Dissolvidos no Líquido e na Atmosfera).....	112
Figura 4.8 – Grade Grossa da ETE H	114
Figura 4.9 – Croqui da Grade Grossa com elementos estruturais	114
Figura 4.10 – Espessura carbonatada e de revestimento medidos nos elementos estruturais da Grade Grossa	115
Figura 4.11 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Grade Grossa.....	116
Figura 4.12 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais da Grade Grossa.....	116
Figura 4.13 – Poço de Sucção na ETE H	117
Figura 4.14 – Croqui do Poço de Sucção com elementos estruturais.....	117
Figura 4.15 – Variação do Nível de Esgoto (NA) no Poço de Sucção ao longo dos anos de 2016 e 2017	118
Figura 4.16 – Variação do NA no PS em 08/01/2016.....	119
Figura 4.17 – Espessura carbonatada e de revestimento medidos nos elementos estruturais do Poço de Sucção.....	120
Figura 4.18 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Poço de Sucção	120

Figura 4.19 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Poço de Sucção	121
Figura 4.20 – Tanque de Transição da ETE H	121
Figura 4.21 – Croqui do Tanque de Transição com elementos estruturais	121
Figura 4.22 – Fissuras na parede TTP3 do Tanque de Transição.....	122
Figura 4.23 – Movimentação verificada no Tanque de Transição	122
Figura 4.24 - Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Transição.....	123
Figura 4.25 –Fratura para realização do ensaio de carbonatação na Parede TTP1 do Tanque de Transição	123
Figura 4.26 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Transição	124
Figura 4.27 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Tanque de Transição.....	125
Figura 4.28 – Imagem interna do Tanque de Transição que mostra paredes cobertas por argamassa.....	125
Figura 4.29 – Edifício que comporta as unidades de pré-tratamento da ETE H.....	126
Figura 4.30 –Croqui do Canal de Chegada ao Tratamento Primário com elementos estruturais	126
Figura 4.31 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Canal de Chegada do Tratamento Preliminar.....	127
Figura 4.32 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Canal de Chegada do Tratamento Preliminar	127
Figura 4.33 – Parede CCP1 do Canal de Chegada	128
Figura 4.34 - Parede CCP2 do Canal de Chegada.....	128
Figura 4.35 – Croqui da Grade Fina com elementos estruturais	128
Figura 4.36 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais da Grade Fina	129
Figura 4.37 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Grade Fina.....	130
Figura 4.38 – Erosão identificada no canal que conduz o efluente aos desarenadores	130
Figura 4.39 – Média de Sólidos Totais Fixos - Afluente (escuro) e Efluente (claro)	131
Figura 4.40 – Concentração de areia no esgoto removida no Desarenador	132
Figura 4.41 – Distribuição Granulométrica da Areia do Desarenador (SANEAGO, 2013) ..	133
Figura 4.42 – Distribuição Granulométrica da Areia do Desarenador (SANEAGO, 2018) ..	134
Figura 4.43 – Croqui da Caixa de Areia com elementos estruturais	134
Figura 4.44 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais da Caixa de Areia	135

Figura 4.45 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Caixa de Areia.....	136
Figura 4.46 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais da Caixa de Areia.....	137
Figura 4.47 – Poro preenchido com etringita na amostra 1.1 (região carbonatada) (x100) ...	138
Figura 4.48 – Poro preenchido com etringita na amostra 1.1 (região carbonatada) (x80)	138
Figura 4.49- Etringita na amostra 1.1 (região carbonatada) (x 1.500)	138
Figura 4.50 –Imagem MEV da amostra 1.1 (região carbonatada) (x 5.000).....	138
Figura 4.51 – Imagem no interior de um poro com realização de EDS localizado na amostra 1.1 (região carbonatada)	139
Figura 4.52 – EDS do ponto 1 apresentado na Figura 4.51	139
Figura 4.53 – Imagem da Figura 4.50 com pontos onde foram realizadas análise de EDS na amostra 1.1 (região carbonatada).....	139
Figura 4.54 – Análise EDS Ponto 1 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada).....	139
Figura 4.55 – Análise EDS Ponto 2 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada).....	139
Figura 4.56 – Análise EDS Ponto 3 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada).....	139
Figura 4.57 – Análise EDS Ponto 4 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada).....	140
Figura 4.58 – Análise EDS Ponto 5 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada).....	140
Figura 4.59 – Análise EDS Ponto 6 da Figura 4.50(Amostra 1.1 – região carbonatada).....	140
Figura 4.60 – Análise EDS Ponto 7 da Figura 4.50(Amostra 1.1 – região carbonatada).....	140
Figura 4.61 – Poro da amostra 1.4 sem presença expressiva de etringita (região não carbonatada) (x 70).....	140
Figura 4.62 – Imagem ampliada do poro da amostra 1.4 (região não carbonatada) (x 2.000)	140
Figura 4.63 – Imagens da amostra 1.4 (região não carbonatada) (x 5.000)	141
Figura 4.64 – Imagem da amostra 1.4 (região não carbonatada) (x 10.000).....	141
Figura 4.65 – Imagem da Figura 4.62 com pontos onde foram realizadas análise de EDS Amostra 1.4 (região não carbonatada).....	141
Figura 4.66 – Análise EDS Ponto 1 da Figura 4.65 (Amostra 1.4 – região não carbonatada)	141
Figura 4.67 – Análise EDS Ponto 2 da Figura 4.65 (região não carbonatada).....	141
Figura 4.68 – Análise EDS Ponto 3 da Figura 4.65 (região não carbonatada).....	141
Figura 4.69 – Análise EDS Ponto 4 da Figura 4.65 (região não carbonatada).....	142
Figura 4.70 – Análise EDS Ponto 5 da Figura 4.65 (região não carbonatada).....	142
Figura 4.71 – Croqui da Calha Parshall com elementos estruturais	142
Figura 4.72 – Espessura carbonatada e de cobertura medidos nos elementos estruturais da Calha Parshall	143
Figura 4.73 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos	

estruturais da Calha Parshall.....	143
Figura 4.74 – Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários e croqui com elementos estruturais	144
Figura 4.75 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários	145
Figura 4.76 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários	145
Figura 4.77 - Decantador da ETE H	146
Figura 4.78 – Croqui padrão dos Decantadores com elementos estruturais.....	146
Figura 4.79 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais dos Decantadores D1, D2 e D3	147
Figura 4.80 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais dos Decantadores D1, D2 e D3.....	148
Figura 4.81 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Decantador D3	148
Figura 4.82 – Pontos com produtos de corrosão	149
Figura 4.83 – Ponto de Umidade no Decantador 3.....	149
Figura 4.84 – Ponto de Infiltração no Decantador 3.....	149
Figura 4.85 – Tanque de Efluente Final da ETE H	149
Figura 4.86 - Croqui do Tanque de Efluente Final da ETE H com elementos estruturais	149
Figura 4.87 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Efluente Final.....	150
Figura 4.88- Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Efluente Final	150
Figura 4.89 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Tanque de Efluente Final.....	151
Figura 4.90 – Tanque de Armazenagem de Lodo da ETE H	151
Figura 4.91 – Croqui do Tanque de Armazenagem de Lodo com elementos estruturais	151
Figura 4.92 - Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Armazenagem de Lodo	152
Figura 4.93– Laje do Tanque de Armazenagem de Lodo (atenção à espessura da camada de impermeabilização)	153
Figura 4.94 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Armazenagem de Lodo	153
Figura 4.95 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Tanque de Armazenagem de Lodo	154
Figura 4.96 – Face inferior da laje superior do tanque de armazenagem de lodo com corrosão	154

Figura 4.97 - GDE das Unidades de Tratamento 1ª e 2ª Avaliação	155
Figura 4.98 - GD Família de Elementos.....	156
Figura 4.99 - Carbonatação e Fatores de Intensidade.....	157
Figura 4.100 - Cobrimento e Fatores de Intensidade.....	157
Figura 4.101 - Corrosão das Armaduras e Fatores de Intensidade	158
Figura 4.102 - Desagregação e Fatores de Intensidade	158
Figura 4.103 - Eflorescências e Fatores de Intensidade	158
Figura 4.104 - Falhas de Concretagem e Fatores de Intensidade	158
Figura 4.105 - Fissuras e Fatores de Intensidade	159
Figura 4.106 - Desplacamento e Fatores de Intensidade.....	159
Figura 4.107 - Manchas e Fatores de Intensidade	160
Figura 4.108 - Sinais de Esmagamento e Fatores de Intensidade	160
Figura 4.109 - Umidade e Fatores de Intensidade.....	160
Figura 4.110 - Erosão e Fatores de Intensidade.....	160
Figura A.1 – Variação do Grau de Dano em função do Fator de Ponderação e do Fator de Intensidade.....	177
Figura A.2 – Variação do Grau de Deterioração do Elemento em função do Fator de Intensidade.....	178
Figura A.3 – Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Lajes em função da quantidade de elementos estruturais	180
Figura A.5 – Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos em função do Fator de Intensidade.....	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Composição típica de sólidos de esgotos domésticos não tratados, conforme Metcalf e Eddy (2003).....	35
Tabela 2.2– Manifestações no concreto em função dos gases presentes nos esgotos apresentados por Metcalf e Eddy (2003).....	37
Tabela 2.3– Concentração de constituintes químicos presentes no esgoto não tratadocitados por Metcalf e Eddy (2003).....	38
Tabela 2.4– Pesquisas realizadas que inspecionaram o concreto de ETEs e manifestações patológicas abordadas/detectadas	47
Tabela 2.5– Requisitos de projeto e execução para estruturas sujeitas a ambientes quimicamente agressivos de acordo com normas brasileiras e internacionais adaptados de: EN (2013), ACI (2014), ABNT (2014) e ABNT (2015)	58
Tabela 2.6–Quantidade de artigos/periódicos obtidos de acordo com as palavras-chave nas bases de dados relacionadas	61
Tabela 2.7– Pesquisas realizadas que aplicaram a Metodologia GDE/UnB	63
Tabela 2.8– Fator de Intensidade do dano x Tipo de Manifestações propostos por FONSECA (2007)	64
Tabela 2.9– Classificação das Famílias de Elementos conforme Fator de Relevância apresentada por Fonseca (2007)	66
Tabela 2.10– Classificação dos níveis de deterioração do elemento e da estrutura apresentada por Fonseca (2007)	67
Tabela 3.1 – Especificação dos concretos nos projetos estruturais da ETE estudada.....	70
Tabela 3.2 – Nomes e siglas de identificação das unidades de tratamento da ETE H	72
Tabela 3.3 - Danos previstos na metodologia GDE/UnB adaptada para ETEs e ensaios para auxílio na avaliação	74
Tabela 3.5 – Quantidade de amostras e inspeções realizadas.....	87
Tabela 3.5 –Plano de amostragem para realização dos ensaios no concreto.....	88
Tabela 3.7 – Legendas dos pontos de amostragem de Sulfeto de Hidrogênio	95
Tabela 3.7 – Fatores de Ponderação para avaliação dos elementos adotados por Fonseca (2007) e propostos para avaliação de ETEs	96
Tabela 3.8 – Fator de Intensidade do dano x Tipo de Manifestações adotados na presente pesquisa	97
Tabela 3.10 – Fator de Relevância adotados por Fonseca (2007) e propostos para avaliação de ETEs conforme família de elementos.....	98
Tabela 3.10 – Ficha Modelo para Avaliação da Deterioração de Lajes de Concreto de ETEs	99

Tabela 3.11 – Ficha Modelo para Avaliação da Deterioração de Paredes de Concreto de ETEs	99
Tabela 3.12 – Análise dos danos para os fatores de intensidade simulados.....	100
Tabela 3.13 - Alteração das Faixas de Classificação do Método GDE/UnB	101
Tabela 4.1 – Resultados das manifestações patológicas observadas e o grau de deterioração, considerando a ETE e a unidade de tratamento em levantamento inicial realizado por Dias, Carasek e Cascudo (2016)	102
Tabela 4.2 – Resultados da análise de sulfeto presente na atmosfera da ETE H e comparação com a literatura existente	110
Tabela 4.3 - Tipos de tratamento e relação com a deterioração do concreto	161
Tabela A.1 - Variação do Grau de Dano em função do Fator de Intensidade e Fator de Ponderação.....	177
Tabela A.2 - Variação do Grau de Deterioração do Elemento em função do Fator de Intensidade.....	178
Tabela A.3 - Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Lajes em função da quantidade de elementos estruturais	179
Tabela A.4 - Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Paredes em função da quantidade de elementos estruturais	180
Tabela B.1 – Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGL1	182
Tabela B.2 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP1	183
Tabela B.3 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP2.....	183
Tabela B.4 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP3.....	184
Tabela B.5 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP4.....	184
Tabela B.6 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSL1	185
Tabela B.7 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP1	185
Tabela B.8 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP2	186
Tabela B.9 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP3	186
Tabela B.10 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP4	187
Tabela B.11 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTL1	187
Tabela B.12 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP1.....	188
Tabela B.13 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP2.....	188
Tabela B.14 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP3.....	189
Tabela B.15 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP4.....	189
Tabela B.16 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CCP1	190
Tabela B.17 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CCP2	190
Tabela B.18 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CCP3	191
Tabela B.19 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GFL1	191
Tabela B.20 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GFP1	192

Tabela B.21 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GFP2	192
Tabela B.22 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP1	193
Tabela B.23 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP2	193
Tabela B.24 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP3	194
Tabela B.25 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP4	194
Tabela B.26 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPL1	195
Tabela B.27 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPP1	195
Tabela B.28 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPP2	196
Tabela B.29 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPP3	196
Tabela B.30 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP1	197
Tabela B.31 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP2	197
Tabela B.32 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP3	198
Tabela B.33 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP4	198
Tabela B.34 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural D1	199
Tabela B.35 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural D2	199
Tabela B.36 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural D3	200
Tabela B.37 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP1	200
Tabela B.38 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP2	201
Tabela B.39 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP3	201
Tabela B.40 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP4	202
Tabela B.41 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLL1	202
Tabela B.42 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP1	203
Tabela B.43 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP2	203
Tabela B.44 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP3	204
Tabela B.45 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP4	204

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI – *American Concrete Institute*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- BS – *British Standards Institution*
- CA – Caixa de Areia ou Desarenador
- CP – Calha Parshall
- CC – Canal de Chegada ao Tratamento Preliminar
- D – Grau do Dano
- D1 – Decantador Primário 1
- D2 – Decantador Primário 2
- D3 – Decantador Primário 3
- D_{máx} – Grau do Dano Máximo
- DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
- DQO – Demanda Química de Oxigênio
- DS – Decantador Secundário
- CO – Carbono Orgânico
- EDS – Espectômetro de Dispersão de Energia
- EN – *European Norm*
- ETEs – Estações de Tratamento de Esgotos
- F_i – fator de intensidade do dano
- F_r – Fator de Relevância Estrutural
- F_p – fator de ponderação
- GG – Grade Grossa
- GF – Grade Final e Canal de condução para o Desarenador
- GDe - Grau de Deterioração do Elemento
- Gdf - Grau de Deterioração da Família
- GDE – Grau de Deterioração das Estruturas
- MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
- NBR – Norma Brasileira de Regulamentação
- PS – Poço de Sucção

SES – Sistemas de Esgotamento Sanitários

TD – Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

TF – Tanque de Efluente Final

TL - Tanque de Armazenagem de Lodo

TT – Tanque de Transição

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)

UFG – Universidade Federal de Goiás

UnB – Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{ck} – Resistência característica do concreto aos 28 dias

f_{cmj} – Resistência de dosagem estimada com adoção de desvio padrão

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	26
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA	27
1.2 OBJETIVO GERAL.....	29
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	29
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES	31
2.1.1 Caracterização Física dos Esgotos Domésticos.....	32
2.1.2 Caracterização Química dos Esgotos Domésticos.....	36
2.1.3 Composição Biológica dos Esgotos Domésticos	39
2.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	43
2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS	44
2.3.1 Principais mecanismos de degradação relacionados ao esgoto	48
2.3.1.1 Erosão.....	48
2.3.1.2 Corrosão das Armaduras	50
2.3.1.3 Corrosão do Aço Induzida por redução do pH do Concreto	51
2.3.1.4 Corrosão do Aço Induzida por Cloretos.....	53
2.3.1.5 Mecanismo da Corrosão das Armaduras.....	54
2.3.1.6 Desagregação do Concreto por Biodeterioração	55
2.3.2 Aspectos de durabilidade em estações de tratamento de esgotos.....	57
2.4 AVALIAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO DE ETEs	59
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS	69
3.1 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	69
3.2 MÉTODOS EMPREGADOS.....	72
3.2.1 Métodos aplicados para diagnóstico do concreto	73
3.2.1.1 Análise Visual	74
3.2.1.2 Profundidade de Carbonatação.....	75

3.2.1.3	Extração de Testemunhos.....	76
3.2.1.4	Avaliação da penetração de cloretos no concreto – Aspersão de Nitrato de Prata	79
3.2.1.5	Dureza superficial – Ensaio Esclerométrico	81
3.2.1.6	Pacometria – Medida da Espessura de Cobrimento	83
3.2.1.7	Resistividade Elétrica.....	84
3.2.1.8	Microscopia Eletrônica de Varredura	85
3.2.2	Métodos e ensaios caracterização dos esgotos	90
3.2.2.1	Análise físico-química dos esgotos e histórico de vazão da ETE.....	90
3.2.2.2	Tempo de detenção hidráulica (TDH) e variação do nível de esgoto dentro de unidades de tratamento	92
3.2.2.3	Velocidade do efluente nas unidades de tratamento preliminar.....	92
3.2.2.4	Métodos analíticos de mensuração de H ₂ S na atmosfera.....	93
3.3	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO (GDE/UnB adaptado)	95
3.3.1	Análise da Classificação do Grau de Deterioração e da Influência da Quantidade de Elementos no G _{df}	100
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		102
4.1	RESULTADOS PARCIAIS OBTIDOS POR PILOTOS	102
4.2	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ETE.....	103
4.3	RESULTADOS DAS ANÁLISES POR UNIDADE DE TRATAMENTO.....	113
4.3.1	Grade Grossa	113
4.3.2	Poço de Sucção.....	116
4.3.3	Tanque de Transição.....	121
4.3.4	Canal de Chegada ao Tratamento Primário.....	125
4.3.5	Grade Fina e Canal de Condução à Caixa de Areia	128
4.3.6	Desarenador ou Caixa de Areia	134
4.3.7	Calha Parshall.....	142
4.3.8	Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários	144
4.3.9	Decantadores Primários	146
4.3.10	Tanque de Efluente Primário (Final).....	149

4.3.11	Tanque de Armazenagem de Lodo	151
4.4	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA GDE/UnB	154
	CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
5.1	CONCLUSÕES	162
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	163
	REFERÊNCIAS	165
	APÊNDICE A - ANÁLISE DA METODOLOGIA GDE/UnB	177
	APÊNDICE B - FICHAS DE AVALIAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DAS UNIDADES.....	182

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto estão susceptíveis à degradação com o tempo. Porém, essa deterioração pode acontecer de maneira mais acelerada dependendo do meio ao qual estão expostas. Fatores como acidez ambiental, por exemplo, podem ocasionar uma redução da durabilidade, porém se o concreto for corretamente especificado e executado, reduzindo sua permeabilidade ou ainda aplicando camadas de proteção sobre o mesmo, essa mesma estrutura poderá apresentar considerável incremento na vida útil, mesmo com entorno agressivo.

Mehta e Monteiro (2008) consideram a água como um dos agentes mais deletérios ao concreto, pois ela proporciona tanto processos físicos de degradação, como processos químicos, por possibilitar o transporte de diversas substâncias químicas potencialmente danosas para o interior do concreto por meio dos poros desse material de construção. Assim, estruturas hidráulicas necessitam de estudos pelos projetistas estruturais para definição das metodologias e critérios de durabilidade que serão adotados para proteger o concreto da ação nociva da água.

Conforme citado anteriormente, a água pode transportar substâncias químicas potencialmente danosas às estruturas de concreto armado e os efluentes domésticos são um exemplo disso. Esgotos domésticos proporcionam ambientes extremamente agressivos ao concreto ocasionando uma degradação rápida da estrutura. Redes coletoras de esgotos, estações elevatórias, interceptores, Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) e emissários são componentes dos Sistemas de Esgotamento Sanitários (SES) que estão sujeitos a esses ambientes.

Nos EUA são investidos anualmente cerca de US\$ 21 Bilhões para implantação de SES (McNALLY; O'CONNELL; RICHARDSON, 2010), já no Brasil, segundo dados do Ministério das Cidades, em 2014 foram investidos R\$ 5,6 milhões de reais em SES (BRASIL, 2016). Os gastos com implantação das ETEs no Brasil, como noção de ordem de grandeza, podem corresponder de R\$ 100,00 a R\$ 450,00/habitante variando de acordo com as faixas

populacionais típicas de cada sistema de tratamento adotado e das condições locais (VON SPERLING, 2014). Assim, nota-se que é necessário um alto investimento nessas unidades dos SES.

Porém, nem sempre estas infraestruturas, tão imprescindíveis para a saúde da população, são construídas de forma tecnicamente durável e economicamente viável. Observam-se deteriorações que ocorrem, em alguns casos, em curto espaço de tempo, tanto por especificações incorretas na fase de projeto, quanto por execução das obras sem controle de qualidade adequado ou ainda por ausência de programas de manutenção.

Vários estudos já foram desenvolvidos sobre a ação dos esgotos no concreto, principalmente, de redes coletoras de esgotos, pois estas formam microclimas fechados em que há ação especial dos sulfatos. (DAVIS *et al.*, 1997; GU *et al.*, 1998; NICA *et al.*, 2000; FERNANDES *et al.*, 2012; MAHMOODIAN; ALANI, 2013; ROMANOVA; MAHMOODIAN; ALANI, 2014) Sabe-se que as ETEs estão sujeitas a diversos agentes agressivos, mesmo assim, os estudos dessas estações de tratamento são menos expressivos quantitativamente do que o das redes e, geralmente, quando acontecem, abrangem somente a deterioração causada por um único agente agressivo (MORADIAN *et al.*, 2012). Os agentes agressivos das ETEs compreendem uma grande quantidade de areia que chega às estações; produtos químicos utilizados para separação das fases do esgoto como, por exemplo, coagulantes à base de cloretos; unidades de remoção de nutrientes como o nitrogênio; e ainda a grande quantidade de sulfetos presentes na atmosfera de estações de tratamento de esgotos devido à atividade microbiana.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

As estruturas de concreto armado de ETEs estão sujeitas a uma série de agentes agressivos sendo eles físicos, químicos e também biológicos e por esse motivo seu ambiente é considerado um dos mais agressivos ao concreto, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015). Essas estruturas demandam altos investimentos e são projetadas para períodos de alcance de projeto de 20 a 30 anos, sendo que mesmo após ampliações para atendimento de incrementos de vazões, há casos em que as unidades antigas continuam operando. Porém, muitas vezes, deteriorações sérias acontecem já nos primeiros anos de operação (McNALLY; O'CONNELL; RICHARDSON, 2010).

As manifestações patológicas nesses componentes quando não monitoradas e tratadas, podem levar ao colapso estrutural visto que a corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais corriqueiramente encontrada em estações de tratamento de esgotos.

Diversos motivos mostram a necessidade de pesquisas que visem investigar as manifestações patológicas em ETEs, quais são eles:

- a) Além dos custos de implantação dessas estruturas serem elevados (McNALLY; O'CONNELL; RICHARDSON, 2010) há uma grande dificuldade de execução de serviços de recuperação, sendo que estes também são elevados. McNally, O'Connell e Richardson (2010) explanam que somente nos EUA são gastos US\$ 25 Bilhões de dólares por ano com a operação e manutenção das unidades dos SES;
- b) As manutenções corretivas são complicadas de serem efetivadas visto que se trata de unidades em operação e não existem formas de paralisações no uso das redes coletoras de esgotos. Assim, quando essas manutenções são necessárias, os efluentes são lançados nos cursos hídricos sem qualquer tipo de tratamento acarretando impactos ambientais graves, além da possibilidade de ocorrências de doenças de veiculação hídrica com a utilização das águas desses mananciais;
- c) As simulações das condições ambientais em laboratório são complicadas visto que há toda uma complexidade entre as interações dos agentes deletérios, assim, pesquisas de campo são fundamentais para aprofundar o conhecimento na área, proporcionando o entendimento dos mecanismos de deterioração e, conseqüentemente, a possibilidade de métodos de prevenção às patologias mais eficientes.

Outro ponto importante sobre a necessidade de levantamento das deteriorações em ETEs é a questão de priorização de manutenções corretivas e para isso é necessário o emprego de uma metodologia para analisar criteriosamente o estado de conservação das unidades. Além disso, esse levantamento pode ocasionar ainda medidas preventivas e especificações diferentes para os concretos de cada unidade de tratamento devido às ações de agentes agressivos específicos de acordo com a unidade.

Cita-se ainda que a realização de pesquisas sobre manifestações patológicas em ETEs proporciona uma etapa importante para gestão de ativos com foco na melhoria contínua, pois problemas detectados em estações existentes podem ser prevenidos quando da construção de novas estações de tratamento de esgoto, empenhando atenção em detalhes construtivos

relevantes, e ainda auxiliam no gerenciamento de reformas das unidades de tratamento.

1.2 OBJETIVO GERAL

Propor adequações na metodologia GDE/UnB (Grau de Deterioração das Estruturas/Universidade de Brasília) para determinação do grau de deterioração do concreto de uma estação de tratamento de esgoto baseando-se na frequência, intensidade e evolução das manifestações.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Discutir as características do esgoto que influenciam na deterioração do concreto;
- ✓ Discutir os mecanismos de deterioração do concreto em estações de tratamento de esgotos;
- ✓ Propor adequações na metodologia GDE/UnB para avaliação do grau de deterioração das estruturas de concreto de ETEs;
- ✓ Identificar os principais fatores que interferem na deterioração correlacionando os problemas detectados com a vazão, características do efluente e as unidades de tratamento.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa se desenvolveu no ambiente de uma estação de tratamento de esgotos do tipo Primário Quimicamente Assistido. A aplicação da presente metodologia em concretos de estações com tratamentos diferentes do abordado neste trabalho podem apresentar danos específicos em função do princípio de tratamento adotado. Assim, cada estação de tratamento deve ser avaliada de forma a destacar suas manifestações patológicas características.

As unidades de tratamento, em sua grande maioria, se enquadram na definição de ambiente confinado proposta na NR 33 (Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego), pois não são projetadas para ocupação humana contínua, possuem meios limitados de entrada e saída e ventilação comprometida (MTE, 2018). Além disso, as unidades de tratamento, dependendo do porte da estação, possuem quase todas as suas unidades com mais de 2,00 m de altura configurando que a vistoria dessas unidades se enquadra como trabalho

em altura, pois existe o risco de queda, conforme NR 35 (MTE, 2018).

Diante do exposto, considerando o ambiente confinado e com gases nocivos à saúde, a altura de muitas unidades, a insalubridade ambiental proporcionada pelo efluente e ainda a dificuldade de acesso ao interior de algumas unidades, a avaliação da estação foi feita de forma a manter e garantir a integridade física do avaliador e, desta forma, muitas análises foram feitas somente na superfície externa do elemento estrutural da unidade. Unidades com maior flexibilidade operacional (com mais de uma unidade funcionando em paralelo) como, por exemplo, os desarenadores, com três unidades, e os decantadores, também com três unidades em paralelo, tiveram um de seus módulos analisados internamente quando não estavam em operação. Embora o objeto trabalhado nesta pesquisa apresente as limitações citadas, buscou-se detalhar a maior quantidade possível de observações das manifestações e os ensaios foram realizados com os critérios necessários.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são tratados os aspectos relacionados à revisão da literatura correspondente à caracterização dos efluentes e dos processos de tratamento, às manifestações patológicas típicas de ETEs e quais as metodologias adequadas para levantamentos e avaliação do estado de conservação de estruturas de concreto.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES

As águas residuárias ou efluentes são originárias de atividades humanas ou industriais e constituídas em sua maior parte de água. Esses efluentes apresentam características de acordo com o uso empregado da água (METCALF; EDDY, 2003; VON SPERLING, 2014). No caso dos esgotos domésticos, a literatura relata que 99,9 % dos esgotos são compostos por água e somente 0,1% corresponde a constituintes sólidos e microrganismos, sendo essa pequena fração a responsável pela necessidade de implantação de SES (VON SPERLING, 2014).

O projeto de estações de tratamento de esgotos é direcionado pelos constituintes potencialmente danosos ao meio ambiente, como areia, metais pesados e microrganismos capazes de causar desequilíbrios nos mananciais. Assim, geralmente a caracterização dos esgotos destina-se exclusivamente à definição do tipo de tratamento que será adotado, desconsiderando-se uma caracterização dos constituintes dos esgotos de forma mais aprofundada, pois os projetos não requerem um nível de detalhamento tão específico e os custos para essas análises, além de demandarem um maior tempo, também são significativos (VON SPERLING, 2014).

Porém, com relação aos aspectos de durabilidade do concreto, é importante compreender de forma mais aprofundada quais são os constituintes, presentes no esgoto, capazes de agredir o concreto para proposição de medidas de proteção que garantam vida útil considerável ao concreto das ETEs. Esses constituintes nem sempre estão presentes nas análises de monitoramento dos efluentes, visto que essas análises são direcionadas pelos órgãos de

controle ambiental com vistas a evitar grandes impactos ambientais. Assim, pretende-se neste tópico correlacionar as características físicas, químicas e biológicas com os ataques potenciais ao concreto.

2.1.1 Caracterização Física dos Esgotos Domésticos

As principais características físicas dos esgotos domésticos consideradas por Qasim (1985¹ *apud* Von Sperling, 2014) são temperatura, cor, odor, turbidez, porém, além dessas, Metcalf e Eddy (2003) consideram também os materiais sólidos enquanto Von Sperling (2014) os considerou uma característica química. Neste trabalho são adotadas as características físicas conforme considerações de Metcalf e Eddy (2003) e nos parágrafos seguintes discute-se cada característica física (Figura 2.1) e sua relação com a deterioração do concreto.

Figura 2.1– Características Físicas dos Esgotos consideradas por Metcalf e Eddy (2003)



A temperatura do esgoto varia conforme a atividade biológica e também conforme o período do ano e a localidade. São ligeiramente superiores à da água e menos variáveis que à do ar (METCALF; EDDY, 2003; VON SPERLING, 2014). Nos EUA, a temperatura dos esgotos varia entre 3° e 27°C, de acordo com Metcalf e Eddy (2003), sendo que a média é de 15,6 °C. Esgotos de ETEs de Goiânia (GO) apresentam temperatura média de 27 °C (SANEAGO, 2016) ambiente ideal para a proliferação das bactérias do gênero *Thiobacillus*, já que elas se desenvolvem melhor em ambientes com temperatura entre 25 °C e 35 °C e são uma das principais responsáveis pela degradação de concreto de ETEs (STANASZEK-TOMAL;

¹ QASIM, S. R. *Wastewater treatment plants: planning, desing and operation*. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1985.

FIERTAK, 2016).

De acordo com Von Sperling (2014), a temperatura tem influência direta nas taxas de reações físicas, químicas e biológicas, além de influenciar ainda na solubilidade dos gases. Desta forma, a temperatura é fator que influencia na taxa de degradação do concreto de forma indireta (MORI *et al.*, 1992). Bond *et al.* (2014) desenvolveram um estudo no qual avaliaram a influência da taxa de concentração de gás sulfídrico, da umidade do ar e da temperatura do ar na desagregação do concreto e concluiu que a temperatura variou, porém não foi possível detectar os efeitos claros da temperatura na desagregação do concreto. Entretanto, o trabalho de Yongsiri *et al.* (2004) mostraram que existe efeitos da temperatura na transferência ar-água de gás sulfídrico (grande responsável pela deterioração do concreto) sendo que esse efeito diminuiu com o aumento do pH além de aumentar a atividade microbiana que produz esse gás.

A cor é um bom indicador sobre a idade do esgoto, sendo que quanto mais escura, mais avançada (VON SPERLING, 2014). Metcalf e Eddy (2003) salientam que na maior parte dos casos as cores dos esgotos variam entre as colorações cinza, cinza escura e negra, sendo que esta última é proveniente de sulfetos metálicos, produtos da reação de sulfetos com metais presentes no esgoto a partir de reações anaeróbias. A cor é uma consequência das reações que ocorrem nos esgotos não interferindo diretamente na degradação do concreto.

A turbidez está associada ao impedimento da passagem da luz no líquido à quantidade de sólidos suspensos e coloidais no meio (VON SPERLING, 2014). Não existe correlação direta entre a turbidez e a concentração de sólidos suspensos totais em esgotos brutos (efluente sem tratamento), porém para esgotos que passaram por sedimentação ou filtração, essa correlação já se torna mais direta (METCALF; EDDY, 2003). Com relação aos aspectos de agressividade ao concreto, esta característica física não se mostra tão representativa.

O odor está relacionado a gases originados pela decomposição da matéria que produz gás sulfídrico, ou amônia e, conseqüentemente, pode ser considerado um indicador de níveis de gases prejudiciais ao concreto. Grasel (2004) desenvolveu um trabalho com vistas a determinar a concentração de sulfeto de hidrogênio no ar próximo a ETEs de Curitiba. As concentrações desse gás variaram entre 0,14 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ e 0,32 $\mu\text{m}/\text{m}^3$, sendo que concentrações maiores foram detectadas quando as temperaturas ambientes estavam mais elevadas (GRASEL, 2004). Quanto maior a concentração de gases no ar, maiores serão os níveis de

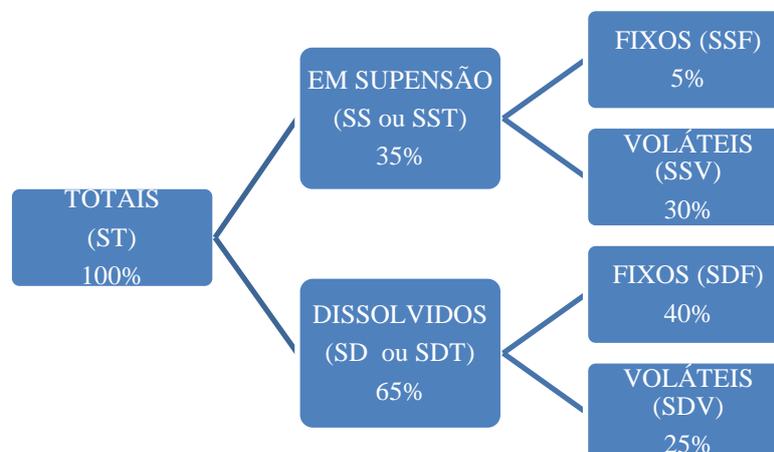
odor e, conseqüentemente, maior a possibilidade de que concentrações desses gases reajam e formem compostos agressivos ao concreto.

Neste trabalho, segue-se a adoção de Metcalf e Eddy (2003) para considerar os materiais sólidos como características físicas dos esgotos. Conforme dito anteriormente, estes representam 0,1% do volume de esgotos e podem ser classificados, de acordo com Von Sperling (2014) por três critérios:

- ✓ Por tamanho e estado:
 - Sólidos em suspensão - particulados (SS - mg/L): Separados por filtragem, em filtro de porosidade padrão;
 - Sólidos dissolvidos - solúveis e coloidais (SD - mg/L): Separado pela evaporação do líquido que foi filtrado.
- ✓ Características químicas:
 - Sólidos Voláteis (mg/L) – matéria orgânica: Separado por oxidação a 500 °C;
 - Sólidos Fixos (mg/L) – matéria inorgânica: Não oxida a 500°C.
- ✓ Sedimentabilidade:
 - Sólidos em suspensão sedimentáveis (mL/L): Sedimentam em 1 hora em um cone Imhoff;
 - Sólidos em suspensão não sedimentáveis (mL/L): Não sedimenta.

De forma sintética a Figura 2.2 mostra as proporções em que os sólidos estão presentes nos esgotos (VON SPERLING, 2014):

Figura 2.2– Distribuição percentual dos materiais sólidos presentes no esgoto adaptado de Von Sperling (2014)



Operações e processos de tratamento são definidos pela necessidade de remoção desses sólidos do efluente. Assim, sólidos grosseiros, pedras e areia serão removidos por meio de um tratamento preliminar utilizando processos físicos. A maior parte da areia é removida por unidades chamadas desarenadores ou caixas de areia. Essas unidades são dimensionadas para velocidades entre 0,25 – 0,4 m/s durante 60 segundos, chamado de Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) o tempo demandado para retenção de areia dentro dessa unidade (METCALF; EDDY, 2003). Desta forma, essa unidade pode estar susceptível à erosão do concreto (BAYNE, 2009; ANDRELLO; GALLETTO, 2015) e um dos motivos para implantação das caixas de areia é justamente proteger unidades e equipamentos que estejam depois delas da ação de atrito proporcionada pela areia (METCALF; EDDY, 2003; VON SPERLING, 2014).

A Tabela 2.1 mostra a composição típica de sólidos nos esgotos proposta por Metcalf e Eddy (2003). Pode-se considerar a areia como sendo parte dos sólidos suspensos fixos. Os sólidos suspensos fixos apresentam a quantidade apresentada Tabela 2.1 podendo variar de 25 a 85 mg/L.

Tabela 2.1– Composição típica de sólidos de esgotos domésticos não tratados, conforme Metcalf e Eddy (2003)

Contaminante	Baixa (mg/L)	Média (mg/L)	Alta (mg/L)
Sólidos Totais	390	720	1230
Sólidos Dissolvidos	270	500	860
Fixos	160	300	520
Voláteis	110	200	340
Sólidos Suspensos	120	210	400
Fixos	25	50	85
Voláteis	95	160	315
Sólidos Sedimentáveis	5	10	20

O teor de areia nos esgotos, mais especificamente, depende de fatores como o tipo de solo, estação do ano (em períodos chuvosos ocorre um aumento da quantidade de areia que ingressa no SES), o tipo de sistema coletor (combinado ou separador absoluto) (METCALF; EDDY, 2003) e não há muitas publicações no meio científico a respeito da caracterização da areia de SES (PRADO; CAMPOS, 2008). Metcalf e Eddy (2003) sugerem valores típicos de 15 L/1000 m³, enquanto a Water Environment Federation (1998²) *apud* Prado (2006) orienta a adoção de valores entre 4 e 37 L/1000 m³, sendo que um estudo realizado pela mesma federação em 22 ETEs americanas mostraram valor médio ponderado de 14 L/1000 m³.

²WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1998). *Design of municipal wastewater treatment plans*. Water Environment Federation manual of practice n. 8. 4. Ed. V.2. Alexandria, USA: Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers.

2.1.2 Caracterização Química dos Esgotos Domésticos

Com relação às características químicas do esgoto, Von Sperling (2014) e Metcalf e Eddy (2003) dividem em dois tipos: orgânicas e inorgânicas. As características químicas inorgânicas estão ilustradas na Figura 2.3. Dentre elas, somente o fósforo e os metais não teriam grandes impactos sobre a durabilidade do concreto.

O Nitrogênio nos esgotos pode ser encontrado na forma de nitrogênio orgânico, amônia (NH_3), íon amônio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-). No esgoto bruto e no efluente tratado, sem etapas de remoção de nitrogênio antes do lançamento, observa-se a concentração de amônia e nitrogênio orgânico. Quando há etapas de nitrificação, os compostos amônia e nitrogênio orgânico são convertidos em nitratos. E, quando são ainda aplicadas etapas de nitrificação e desnitrificação (fazendo com o que o nitrogênio seja parcialmente consumido e removido do efluente), o nitrogênio está presente em todas as suas formas, porém em concentrações menores (VON SPERLING, 2014). Trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de verificar o ataque por nitratos ao concreto em estações que possuem operações para remoção de nitrogênio. No ambiente alcalino do concreto, há liberação de gases de amônia e íons de hidrogênio que reagem com a Portlandita e promovem a lixiviação do concreto e ataque ácido (DAVIS *et al.*, 1998; PCA, 2002; LEEMAN *et al.*, 2010).

Figura 2.3– Constituintes químicos inorgânicos de esgotos domésticos não tratados relacionados por Metcalf e Eddy (2003)



Com relação ao pH, este é alterado significativamente pela ação das bactérias tanto acidificando o meio quanto alcalinizando, podendo ocasionar a deterioração do concreto. Por exemplo, a acidez torna o gás sulfídrico mais volátil e, conseqüentemente, viabiliza a formação de ácido sulfúrico (MARQUEZ-PEÑARANDA; SANCHEZ, 2016). O pH tem forte influência sobre a deterioração do concreto, conforme exposto por Sarray (2013). Quando for tratado no item 2.1.1 sobre as características biológicas será aprofundado sobre o assunto.

Ambientes extremamente alcalinos também podem trazer prejuízos ao concreto, principalmente em temperaturas elevadas, pois causam a dissolução e a lixiviação dos silicatos e aluminatos do cimento hidratado (REPETTE; HELENE, 1998). A alcalinidade dos esgotos é proveniente de hidroxilas, carbonatos e bicarbonatos (METCALF; EDDY, 2003). Porém, a alcalinidade do esgoto, que de acordo com Metcalf e Eddy (2003) varia de 60 a 120 mg/L (CaCO_3), não traz grandes preocupações com relação à durabilidade do concreto.

Dentre os gases presentes nos esgotos cita-se: nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio, amônia e metano. Os três últimos são provenientes da decomposição de matéria orgânica nos esgotos (METCALF; EDDY, 2003). A Tabela 2.2 mostra quais as reações ou manifestações que podem acontecer no concreto na presença desses gases.

Tabela 2.2– Manifestações no concreto em função dos gases presentes nos esgotos apresentados por Metcalf e Eddy (2003)

Gás	Reação/Manifestação no Concreto
Dióxido de Carbono (CO_2)	Carbonatação (Redução do pH do concreto e formação de carbonatos de cálcio)
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	Formação de Ácido Sulfúrico (Dissolução da pasta de cimento)
Amônia (NH_3)	Lixiviação do concreto e Ataque Ácido

Os cloretos estão presentes no esgoto de forma menos concentrada, como é possível observar na Tabela 2.3 e esses cloretos, geralmente, não são capazes de desencadear reações de corrosão. Os valores de concentração apresentados por Metcalf e Eddy (2003) são bem parecidos com a concentração de 70 mg/L detectada por Kim e Lee (2010) em uma ETE do Irã. Porém, estações de tratamento que apresentem unidades de tratamento para desinfecção por cloro ou coagulantes à base de cloretos estão sujeitas a sérias deteriorações por ataque por cloretos, principalmente nos locais de armazenamento, dosagem e ponto de aplicação.

Os Sulfatos são necessários para a síntese de proteínas e liberados quando há degradação das mesmas. Assim, o sulfato é reduzido biologicamente em condições anaeróbias para sulfetos que se combina com o íon hidrogênio formando gás sulfídrico. Bactérias conhecidas como

sulfoxidantes, transformam o gás sulfídrico em ácido sulfúrico, extremamente danoso ao concreto (METCALF; EDDY, 2003). Há estudos que relatam que a formação de gás sulfídrico pode acontecer de forma biótica e abiótica, porém de forma biótica as reações acontecem de maneira mais rápida (JENSEN *et al.*, 2009). Kim e Lee (2010) relataram que a concentração de sulfatos no esgoto em uma ETE do Irã era de 186 mg/L que em comparação com o exposto na Tabela 2.3 por Metcalf e Eddy (2003) é bem mais elevado.

A Tabela 2.3 expõe a quantidade relativa a cada constituinte químico presente nos esgotos não tratados, de acordo com Metcalf e Eddy (2003).

Tabela 2.3– Concentração de constituintes químicos presentes no esgoto não tratado citados por Metcalf e Eddy (2003)

Contaminante	Baixa (mg/L)	Média (mg/L)	Alta (mg/L)
DBO	110	190	350
Carbono Orgânico Total	80	140	260
DQO	250	430	800
Nitrogênio	20	40	70
Orgânico	8	15	25
Amônia Livre*	12	25	45
Nitrito	0	0	0
Nitrato	0	0	0
Fósforo	4	7	12
Fósforo Orgânico	1	2	4
Inorgânico	3	5	10
Cloretos	30	50	90
Sulfatos	20	30	50

* A taxa de Amônia Livre encontrada nos esgotos por Kim e Lee (2010) foi de 28mg/L.

A Figura 2.4 ilustra as características químicas orgânicas dos esgotos. Essas características não têm influência direta sobre a degradação do concreto, porém como estão relacionadas à atividade microbiana, podem trazer consequências à durabilidade do concreto e assim elas são aqui definidas de maneira sucinta.

DBO é a Demanda Bioquímica de Oxigênio e se resume a quantidade de oxigênio consumida por bactérias para degradação da matéria orgânica. A DBO é um dos parâmetros mais importantes para gerenciamento operacional da estação, porém não apresenta implicações diretas na deterioração do concreto.

Figura 2.4– Constituintes químicos orgânicos de esgotos domésticos não tratados listados por Metcalf e Eddy (2003)



A DQO é a Demanda Química de Oxigênio e é utilizada para mensurar o oxigênio equivalente da matéria orgânica que pode ser oxidado quimicamente. A redução de sulfato proporciona a formação de gás sulfídrico em ambientes anaeróbios. Quando a relação DQO/Sulfato é superior a 10, grande parte do sulfeto de hidrogênio é removido da fase líquida sendo liberado para o ambiente acarretando um ambiente quimicamente mais agressivo ao concreto. A Equação 2.1 apresenta a estimativa da DQO utilizada para redução de sulfato, portanto verifica-se que 1mol de SO_4^{2-} requer 2 moles de oxigênio para sua redução a sulfeto (CHERNICHARO, 2007):

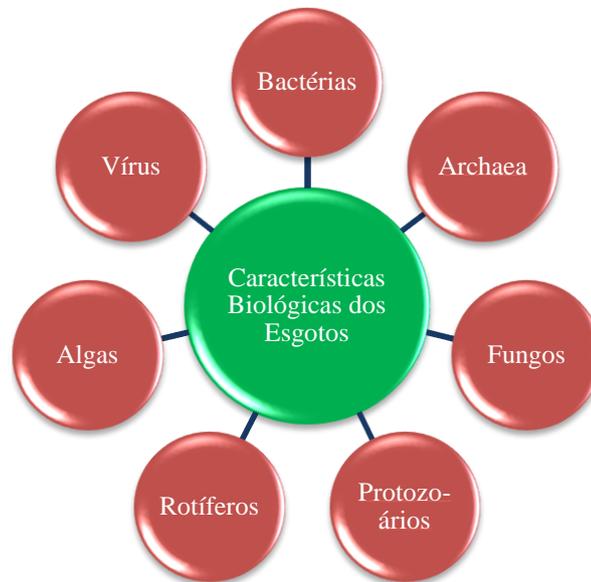


O CO (Carbono Orgânico) é uma medida da quantidade total de carbono de origem orgânica (matéria orgânica) presente no esgoto (METCALF; EDDY, 2003) e não apresenta grande influencia na deterioração do concreto.

2.1.3 Composição Biológica dos Esgotos Domésticos

A composição biológica dos esgotos refere-se à presença dos microrganismos conforme proposto por Metcalf e Eddy (2003) e ilustrado na Figura 2.5.

Figura 2.5– Constituintes biológicos presentes em esgotos domésticos não tratados citados por Metcalf e Eddy (2003)



Microrganismos como as algas são extremamente relevantes para os processos de tratamento biológico, assim como as bactérias e as *archaeas*. Os fungos são muito importantes na decomposição dos lodos originados no processo de tratamento dos esgotos. Protozoários auxiliam no polimento e na degradação de bactérias antes do lançamento dos efluentes. Rotíferos indicam alta eficiência de tratamentos aeróbios e também a eliminação de bactérias do efluente (METCALF; EDDY, 2003).

Dentre os microrganismos nocivos ao concreto presente no efluente doméstico destacam-se, principalmente, fungos e bactérias. Vários são os estudos que têm sido desenvolvidos para investigar e caracterizar os microrganismos responsáveis pela biodeterioração do concreto (SHIRAKAWA, 1994; DAVIS *et al.*, 1998; GU *et al.*, 1998; NICA *et al.*, 2000; GIANNANTONIO *et al.*, 2009; LEEMANN *et al.*, 2010; MARQUEZ-PEÑARANDA; SANCHEZ, 2016).

Existem dois tipos de bactérias sulfoxidantes que podem ser nocivas ao concreto: as acidófilas e as neutrófilas. Essas bactérias, conforme estudos de Davis *et al.* (1998) e também Marquez-Peñaranda e Sanchez (2016), se desenvolvem de acordo com a teoria da sucessão microbiológica. As bactérias neutrófilas se desenvolvem em pH ótimos de 5 a 8

(relativamente neutro), já as bactérias acidófilas, em pH de 0 a 5 (BIELEFELDT *et al.*, 2010³ *apud* MARQUEZ-PEÑARANDA; SANCHEZ, 2016). As bactérias neutrófilas tornam o ambiente propício ao desenvolvimento de bactérias acidófilas (DAVIS *et al.*, 1998; MARQUEZ-PEÑARANDA; SANCHEZ, 2016). O esgoto apresenta, de forma geral, pH igual a 7 e desta forma é um ambiente favorável ao desenvolvimento das bactérias neutrófilas.

Em seus estudos Marquez-Peñaranda e Sanchez (2016) avaliaram a atuação de bactérias neutrófilas e acidófilas isoladamente e também a atuação das duas juntas (chamando de consórcio), além de avaliar a desagregação do concreto em presença de gás sulfídrico abiótico. Os autores concluíram que a maior perda da resistência à compressão das amostras analisadas foi na presença do consórcio das bactérias acidófilas e neutrófilas. Outra conclusão dos autores foi com relação ao aparecimento de etringita na pasta cimentícia: nas amostras submetidas ao ambiente biótico a presença de etringita foi verificada a partir de 90 dias, enquanto que em meio abiótico, 210 dias. Esse resultado permite concluir que o ambiente biótico causado por microrganismos é muito mais nocivo à durabilidade do concreto.

Nos estudos realizados por Davis *et al.* (1998), foram feitas análises microbiológicas de heterotróficos aeróbicos, heterotróficos anaeróbicos, bactérias redutoras de nitratos, bactérias oxidantes de amônia e bactérias redutoras de sulfatos (acidófilas e neutrófilas). Concretos localizados na coroa dos tubos de esgoto apresentam uma quantidade maior de bactérias acidófilas, enquanto ao nível de escoamento (*springline*) há uma maior concentração de bactérias neutrófilas, de acordo com estudos de Davis *et al.* (1998).

Shirakawa (1994) estudou a biodeterioração do concreto causada por um tipo específico de bactérias do gênero *Thiobacillus*. A pesquisadora cita em seu trabalho que as primeiras bactérias a se desenvolverem são as quimiolitotróficas facultativas em pH neutro ou ligeiramente alcalino. A partir de então surgem as *neapolitanus* quando o pH atinge o patamar de 6 e começam a se desenvolver reduzindo o pH para menos de 5, momento em que se desenvolvem as bactérias acidófilas. A Figura 2.6 proposta por Shirakawa (1994) e a Figura 2.7 proposta por Islander *et al.* (1991⁴) *apud* Noeiaghahi *et al.* (2017) ilustram os tipos de bactérias e as faixas de pH em que se desenvolvem, apresentando assim a teoria da sucessão microbiológica. A Figura 2.7 ainda correlaciona a ocorrência da taxa de corrosão com a

³ BIELEFELDT, A.; GUTIERREZ-PADILLA, M. G. D.; OVTCHINNIKOV, S.; SILVERSTEIN, J.; HERNANDEZ, M. Bacterial kinetics of sulfur oxidizing bacteria and their biodeterioration rates of concrete sewer pipe samples. **Journal Environmental Engineering** 136:731–738, 2010.

⁴ ISLANDER, R.; DEVENNY, J.; MANSFELD, F.; POSTYN, A.; SHIH, H. Microbial ecology of crown corrosion sewer. **Journal Environmental Engineering**.117 (6) (1991) 751 – 770.

redução do pH da superfície do concreto.

Figura 2.6– Sequência do desenvolvimento sucessivo de espécies neutrofílicas e acidofílicas de *Thiobacillus* proposto por Shirakawa (1994)

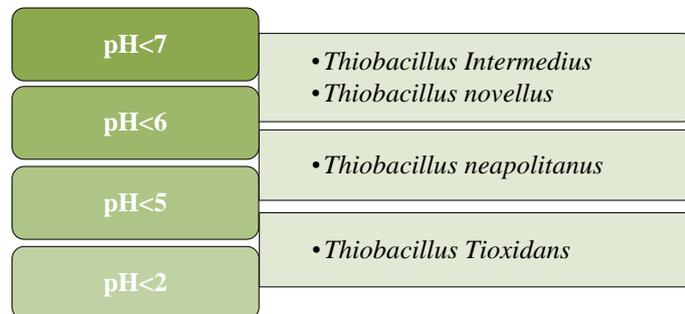
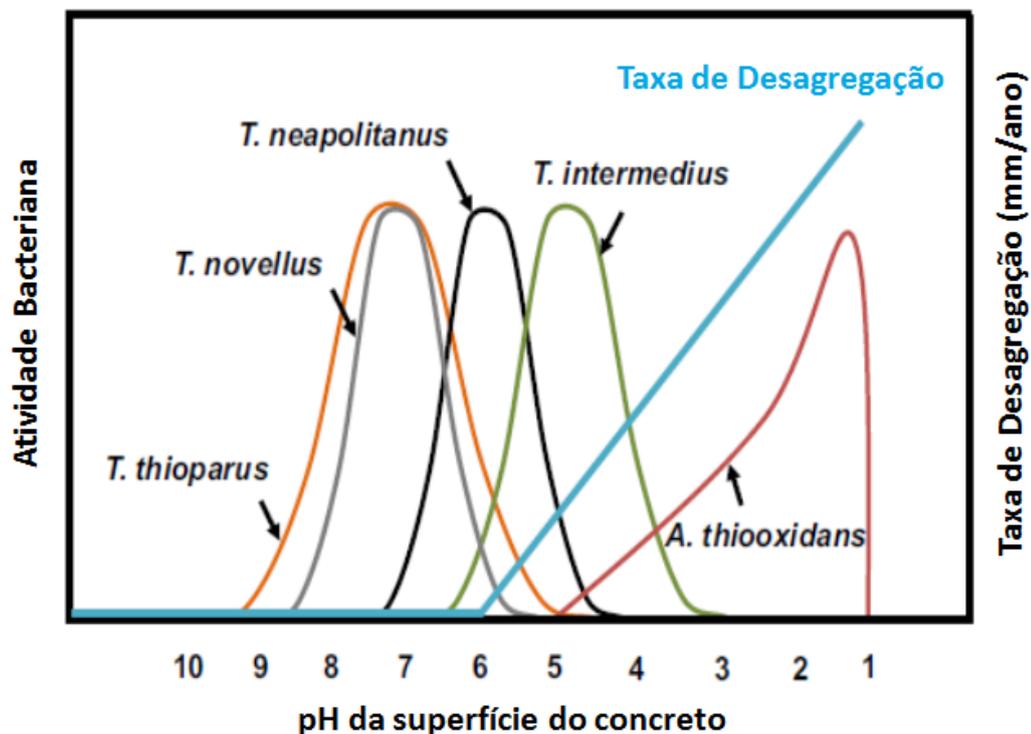


Figura 2.7 –Sucessão ecológica da *Thiobacillus sp.* na superfície do concreto exposto ao sulfeto de hidrogênio



Fonte: Adaptado de Islander, *et al.* (1991⁴) *apud* Noeiaghahi *et al.* (2017)

A deterioração por fungos acontece com a dissolução de portlandita e silicatos hidratados pelos ácidos, degradando o concreto e gerando manchas de diversas colorações que prejudicam o aspecto visual do concreto (GAYLARDE; GAYLARD, 2002; GU *et al.*, 1998).

Em seu estudo Gu *et al.* (1998) isolaram um fungo da espécie *Fusarium* e concluíram que as reações ocasionadas por produtos metabólicos ácidos desse fungo e o concreto formam complexos orgânicos de cálcio. Giannantonio *et al.* (2009) concluíram que o desenvolvimento

de fungos no concreto pode ser influenciado pela composição desse material de construção, além de depender da quantidade de nutrientes disponíveis para que eles realizem seus processos metabólicos.

Leemann *et al.* (2010) realizaram uma pesquisa sobre a influência da dureza da água na deterioração da superfície do concreto causada por biofilmes nitrificantes em estações de tratamento de esgotos. As bactérias nitrificantes são autótrofas e conhecidas como *Nitrossomas*, *Nitrobactérias*, *Nitrospira* e *Nitrosococcus*. O pH nos tanques de nitrificação permanece entre 6,6 e 7,5, porém é menor na superfície do concreto devidos aos ácidos produzidos no processo de nitrificação, desencadeando assim a deterioração do concreto.

2.2 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Não se pretende aqui esgotar o conhecimento sobre o tratamento de efluentes domésticos, haja vista que é uma área ampla e complexa, entretanto é necessário que sejam expostos os conceitos básicos do tratamento de efluentes de forma a possibilitar a compreensão dos processos de tratamento e seus efeitos sobre as estruturas de concreto. Von Sperling (2014) classifica os níveis de tratamento de esgotos em quatro:

- a) **Preliminar:** O tratamento preliminar remove, por meio de processos físicos, materiais grosseiros e de maiores dimensões além de remover também areia. São exemplos de unidades de tratamento preliminar as grades, os desarenadores. As unidades de medição de vazão, como a Calha Parshall e vertedores, também são incluídas nesta fase do tratamento. Esta fase do tratamento protege as unidades posteriores da estação contra deteriorações de suas unidades e equipamentos.
- b) **Primário:** O tratamento primário remove sólidos sedimentáveis e matéria orgânica, embora esta matéria orgânica seja em menor quantidade, além de remover sólidos flutuantes, como é o caso de óleos e gorduras. Esta fase do tratamento também utiliza processos físicos e, geralmente, antecede o tratamento biológico, exemplos deste tipo de unidade são os decantadores primários. Em casos em que é necessário o aumento da eficiência de remoção de matéria suspensa, são adicionados coagulantes na linha de tratamento de forma a aglutinar as partículas, aumentando o seu peso e removendo-as do esgoto por meio de sedimentação, essa configuração é conhecida como tratamento primário avançado ou quimicamente assistido.

c) **Secundário:** O tratamento secundário tem como principal objetivo remover matéria orgânica por meio processos biológicos, embora os processos físicos façam parte dessa etapa de tratamento. Os processos biológicos são coordenados por diversos tipos de microrganismos, conforme citado no item 2.1.3. A matéria orgânica é composta por moléculas que possuem carbono e, desta forma, a digestão dessas moléculas por microrganismos liberam como produtos finais gás carbônico, água. Entretanto, o tratamento biológico pode ocorrer de duas formas: por digestão aeróbia e por digestão anaeróbia.

Na digestão aeróbia, as bactérias utilizam o oxigênio disponível no esgoto para sua respiração e oxidação da matéria orgânica, geralmente esse tipo de digestão ocorre nas camadas mais rasas dos tanques de tratamento, onde há mais oxigênio disponível ou em casos de tanques aerados, pode ocorrer em todos os estratos do nível de esgoto.

A digestão anaeróbia utiliza o oxigênio presente em proteínas e aminoácidos na respiração dos microrganismos e acontece nas camadas mais profundas dos tanques onde a dissolução de oxigênio é baixa. O fato das bactérias utilizarem o oxigênio das proteínas e aminoácidos em sua respiração proporciona a liberação de íons sulfeto no esgoto e este fator o grande responsável pela geração do gás sulfídrico nos esgotos.

As unidades que englobam os processos de tratamento secundário são bastante diversificadas cita-se alguns exemplos: tanques de aeração e decantadores secundários de processos de tratamento por lodos ativados, reatores UASB, lagoas de estabilização.

d) **Terciário:** O tratamento terciário tem como finalidade a remoção de nutrientes como fósforo, potássio e nitrogênio, além de microrganismos patogênicos. A remoção de patógenos pode ser realizada por meio de tanques de desinfecção utilizando-se compostos a base de cloro ou lagoas de maturação.

2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

O ambiente de Estações de Tratamento de Esgotos é extremamente agressivo ao concreto, principalmente devido ao ataque por ácido sulfúrico oriundo de atividade biogênica. Porém, outras manifestações patológicas estão presentes e nem sempre estudos alinham a interação

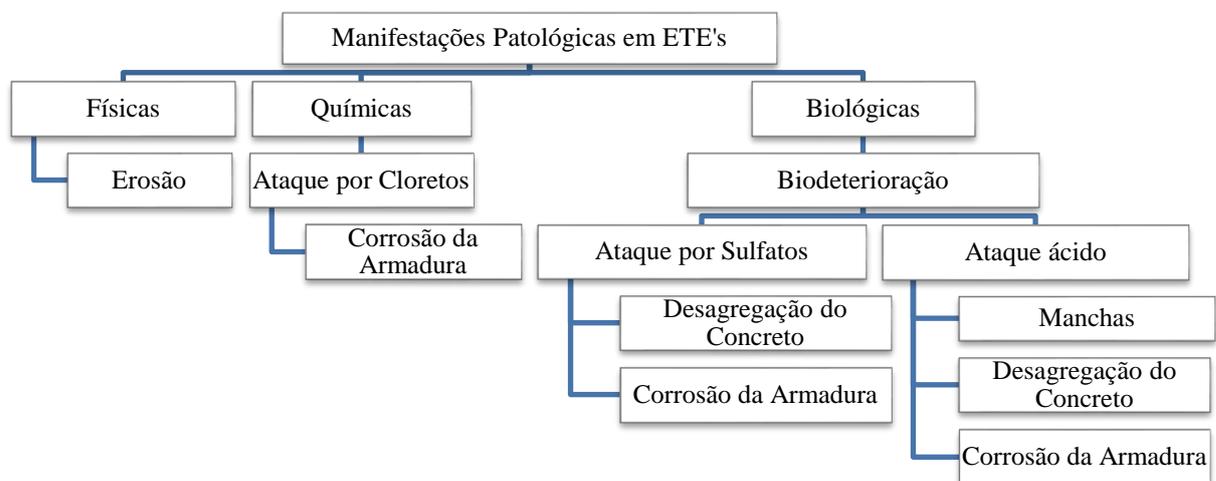
entre as diversas causas de deterioração do concreto armado para avaliação da estação como um todo.

Moradian *et al.* (2012) relatam que muitas pesquisas mantêm alguns parâmetros e simulam a agressividade de outros, porém não consideram a interação entre os mecanismos de degradação. Assim, o estudo elaborado pelos pesquisadores relata o ataque complexo que acontece em uma ETE analisando três unidades específicas: canal de entrada, decantador primário e tanque de aeração. Os autores obtiveram dados de projeto relacionados ao consumo de cimento, tipo de agregado e cobrimento e avaliaram os seguintes parâmetros (MORADIAN *et al.*, 2012): teor de cloretos, absorção de água, resistência à compressão, constituintes químicos (obtidos por difração de raios X), carbonatação, corrosão (analisado pelo método do potencial eletroquímico).

Embora o trabalho de Moradian *et al.* (2012) seja um ótimo exemplo sobre a complexidade das manifestações em ETEs, fatores como erosão, o ataque por ácido biogênico e biodeterioração, perda de massa e ainda fatores correlatos à própria operação da estação como, por exemplo, tempo de detenção hidráulica nas unidades e o teor de sulfetos não foram correlacionados e/ou avaliados.

As manifestações patológicas podem ter diversas origens ocasionando diferentes sintomas e mecanismos de deterioração. Para efeito deste trabalho serão discutidos os mecanismos de deterioração elencados na Figura 2.8.

Figura 2.8– Manifestações Patológicas Típicas de Estações de Tratamento de Esgotos



A divisão proposta na Figura 2.8 deve ser considerada com certa precaução visto que as origens físicas, químicas e biológicas estão fortemente correlacionadas, como por exemplo, o ataque por sulfatos é uma degradação química de origem biológica.

Foram encontrados alguns trabalhos na literatura que fizeram inspeções sobre as condições e estado de conservação das estruturas de concreto de estações de tratamento de esgotos e tipos de manifestações patológicas detectadas ou revisões da literatura sobre as manifestações mais frequentes nessas obras de infraestrutura. Esses trabalhos foram compilados na Tabela 2.4 e embora tenham como objeto as estações de tratamento de esgoto, optam por investigar em maior profundidade as manifestações patológicas causadas pela deterioração biológica que causam desagregação da pasta de cimento por ácido sulfúrico biogênico.

Tabela 2.4– Pesquisas realizadas que inspecionaram o concreto de ETEs e manifestações patológicas abordadas/detectadas

Manifestação Patológica	Moradian <i>et al.</i> (2012)	Kim e Lee (2009)	Müller (2015)	Hoppe Filho <i>et al.</i> (2014)	Berenguer <i>et al.</i> (2014)	Hasan (2011)	Sarray (2013)	Bayne (2009)	Leemann, Lothenbach e Hoffmann (2010)	Dias, Carasek e Cascudo (2016)	Kulich (2011)	Manifestações relatadas por pesquisa
Fissuras			x		x		x					3
Desagregação do Concreto*	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	10
Corrosão das Armaduras	x						x	x		x		4
RAA					x							1
Carbonatação	x		x				x	x				4
Cobrimento Deficiente			x				x					2
Contaminação por Cloretos	x							x				2
Eflorescências			x		x		x					3
Falhas de Concretagem			x									1
Manchas/ Bolors					x					x		2
Umidade			x				x					2
Condições de Gelo-Degelo								x				1
Erosão					x			x		x		3

*Desagregação/Corrosão do Concreto: Engloba reações de desintegração da pasta de cimento causadas por ataques ácidos ou ataques por sulfatos provocados por biodeterioração.

2.3.1 Principais mecanismos de degradação relacionados ao esgoto

Mehta e Monteiro (2008) consideram a água como um dos agentes mais deletérios às estruturas de concreto armado. Assim, a taxa de deterioração de uma estrutura está vinculada à velocidade com que a água consegue penetrar nos poros do concreto, tornando bastante importante a propriedade de permeabilidade do concreto. Como o esgoto constitui-se essencialmente de água e ainda possui constituintes químicos e biológicos que podem ser danosos ao concreto, as estruturas de estações tornam-se susceptíveis ao aparecimento de diversas manifestações patológicas.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) e Neville e Brooks (2013), a durabilidade do concreto está estritamente relacionada à sua permeabilidade tanto à água quanto aos gases, pois é essa propriedade que torna possível o transporte de agentes agressivos para o interior do concreto ocasionando sua deterioração. Neville e Brooks (2013) frisam ainda que essa propriedade é relevante para tanques destinados ao tratamento de esgoto. A permeabilidade do concreto dependerá de fatores relacionados à relação água/cimento e até mesmo da idade, assim como da presença de adições minerais (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Conforme observado, os mecanismos de deterioração estão relacionados entre si e um pode desencadear outro. Assim, são discutidos a seguir os mecanismos principais de deterioração do concreto de ETEs. Não se pretende neste trabalho conceituar e explanar sobre todos os tipos de manifestações que causam deterioração no concreto como, por exemplo, trincas e fissuras, lixiviação entre outras que podem ocorrer em qualquer tipo de estrutura de concreto. O que se pretende nesta subseção é relacionar as degradações ao concreto que estão relacionadas ao ambiente que esgotos sanitários domésticos proporcionam.

2.3.1.1 Erosão

Há uma grande discussão relacionada à nomenclatura adequada sobre o fenômeno de desgaste superficial por água com sólidos. Assim, Kormann (2002) e Graham (2000⁵ *apud* Aguiar, 2012) consideram que “a abrasão e a erosão são processos erosivos em estruturas hidráulicas de concreto”. Já Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997) consideram abrasão desgaste por atrito seco e erosão desgaste por atrito em meio a fluido. Neste trabalho é considerado o

⁵GRAHAM, J.R. (Coord.) *Erosion of Concrete in Hydraulic Structures*. American Concrete Institute ACI 210R-93. 23p., 2000.

conceito de Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997).

Portanto, erosão é passagem do líquido contendo partículas sólidas em suspensão, ocasionando o desgaste superficial do concreto e a remoção da pasta superficial de cimento, o carreamento do agregado miúdo e a exposição do agregado graúdo (BERTOLINE, 2006; MEHTA; MONTEIRO, 2008; SANTOS; 2012).

A areia apresenta dureza bastante elevada, chegando a atingir o patamar de 7 na escala Mohs. Devido a essa característica, as partículas de areia em suspensão propiciam aos efluentes a capacidade de desgastar superficialmente o concreto. A Figura 2.9 ilustra o mecanismo de degradação causado por sólidos suspensos no esgoto.

Figura 2.9– Mecanismo de desgaste causado pela Erosão elencados por Aguiar (2012)



Como na presença do esgoto e, conseqüentemente, de microrganismos que produzem substâncias deletérias ao concreto, há um enfraquecimento da superfície da pasta de cimento, é possível perceber o desgaste superficial em caixas de areia de ETEs no nível de escoamento do efluente (BAYNE, 2009; DIAS; CARASEK; CASCUDO, 2016). O aspecto dessa deterioração é de pequenas cavas que expõem o agregado graúdo. Em unidades com altas velocidades e grandes quantidades de areia no fluido, o aspecto é de polimento (AGUIAR, 2012).

Choi e Bolander (2012), Mehta e Monteiro (2008), Kormann (2002) e Aguiar (2012) citam algumas propriedades importantes que influenciam na manifestação de erosão no concreto:

- ✓ Tamanho, forma, dureza e quantidade de partículas transportadas pelo efluente;
- ✓ Velocidade do fluxo;
- ✓ Ângulo de contato;
- ✓ Qualidade do concreto;
- ✓ Relação a/c (porosidade);
- ✓ Características do agregado graúdo (natureza petrográfica, resistência à abrasão e à

compressão, dimensão máxima, granulometria, dosagem);

- ✓ Aderência entre os agregados e a pasta de cimento.

Um concreto com elevada resistência à compressão não é necessariamente resistente à erosão, pois a erosão está relacionada à resistência superficial do concreto. Assim, para que o concreto apresente um melhor desempenho à erosão é interessante a utilização de agregados com maior dureza, lançamento e adensamento adequados, baixo teor de ar incorporado, cuidados com a exsudação, pois ela aumenta a relação água/cimento na superfície, além de cuidados com o acabamento superficial e a cura (MEHTA;MONTEIRO, 2008; ALMEIDA (2000); GEBLER, 2001⁶ *apud* AGUIAR, 2012).

2.3.1.2 Corrosão das Armaduras

A corrosão das armaduras é o processo pelo qual o metal é oxidado por meio de sua interação com o meio, proporcionando a perda de resistência mecânica, elasticidade e ductilidade (CASCUDO, 1997).

De acordo com Cascudo (1997) a corrosão de armaduras “é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, em que o eletrólito apresenta características de resistividade elétrica consideravelmente mais altas do que as dos eletrólitos típicos (meio aquoso comum, não confinado a uma rede de poros, como é o caso do concreto)”.

O concreto, devido a presença de álcalis (Ca(OH)_2 , KOH, NaOH), apresenta elevada basicidade. Em idades avançadas, o hidróxido de cálcio é convertido em carbonato de cálcio e a o pH elevado do concreto passa a ser proveniente dos hidróxidos de potássio e sódio (CASCUDO, 1997).

Essa alcalinidade proporciona a formação de uma película protetora em volta da armadura, sendo esta a responsável pela proteção do aço contra a corrosão, pois ela impede que a umidade, oxigênio ou agentes agressivos alcancem o aço. Essa camada fina (quase invisível) e muito aderida ao aço é uma proteção química do aço e composta por óxidos de ferro, sendo conhecida no meio técnico como camada passivadora ou película de passivação (CASCUDO, 1997). O pH do concreto, que em condições normais varia numa faixa de 11 a 13, é um dos fatores químicos mais importantes de proteção da armadura e sua alteração pode favorecer a atividade de bactérias, fungos ou outros agentes agressivos ocasionando a corrosão tanto do

⁶GEBLER, S.H. (Coord.) **Guide to Curing Concrete**. American Concrete Institute ACI 308-R 01. 31p., 2001.

concreto quanto da armadura.

Além dessa camada química, a presença de plaquetas de Ca(OH)_2 precipitadas na superfície metálica proporcionam uma proteção física contra a corrosão, além da proteção física conferida pelo cobrimento do concreto (CASCUDO, 1997).

A corrosão das armaduras se divide em duas fases: Iniciação e Propagação, de acordo com o modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982⁷ *apud* CASCUDO, 1997). A fase de iniciação compreende o período da confecção da estrutura até o momento em que a armadura é despassivada por um agente agressivo podendo ser por carbonatação ou por ação de cloretos. A fase de propagação é o período em que os ataques continuam até que a estrutura esteja totalmente comprometida (CASCUDO, 1997).

2.3.1.3 Corrosão do Aço Induzida por redução do pH do Concreto

A carbonatação, embora não seja por definição uma manifestação patológica, é responsável pela alteração química do pH do concreto. Ela acontece à medida que o gás dióxido de carbono (CO_2) permeia pelos poros do concreto e reage com a Portlandita (Ca(OH)_2) formando Carbonato de Cálcio (CaCO_3) e reduzindo o pH do concreto. Ela ocorre de maneira generalizada em qualquer estrutura de concreto exposta ao ar e o seu progresso no interior do concreto é chamado de frente de carbonatação. A frente de carbonatação é uma separação nítida entre o concreto com pH menor que 9 (carbonatado) e o pH maior que 12 (não carbonatado) (CASCUDO, 1997).

A redução do pH do concreto por carbonatação expõe a armadura à ação de agentes deletérios por proporcionar a desconstituição da camada passivadora do aço que o protege contra a corrosão (CASCUDO, 1997). O pH é uma das características mais importantes em praticamente todos os mecanismos de degradação, pois geralmente as deteriorações são iniciadas com a alteração desta importante característica química. O pH do concreto carbonatado é da ordem de 9 e a literatura relata que de forma geral, com pH entre 11,5 e 11,8 já não é mais possível assegurar a integridade da camada passivadora do aço (CASCUDO; CARASEK, 2011).

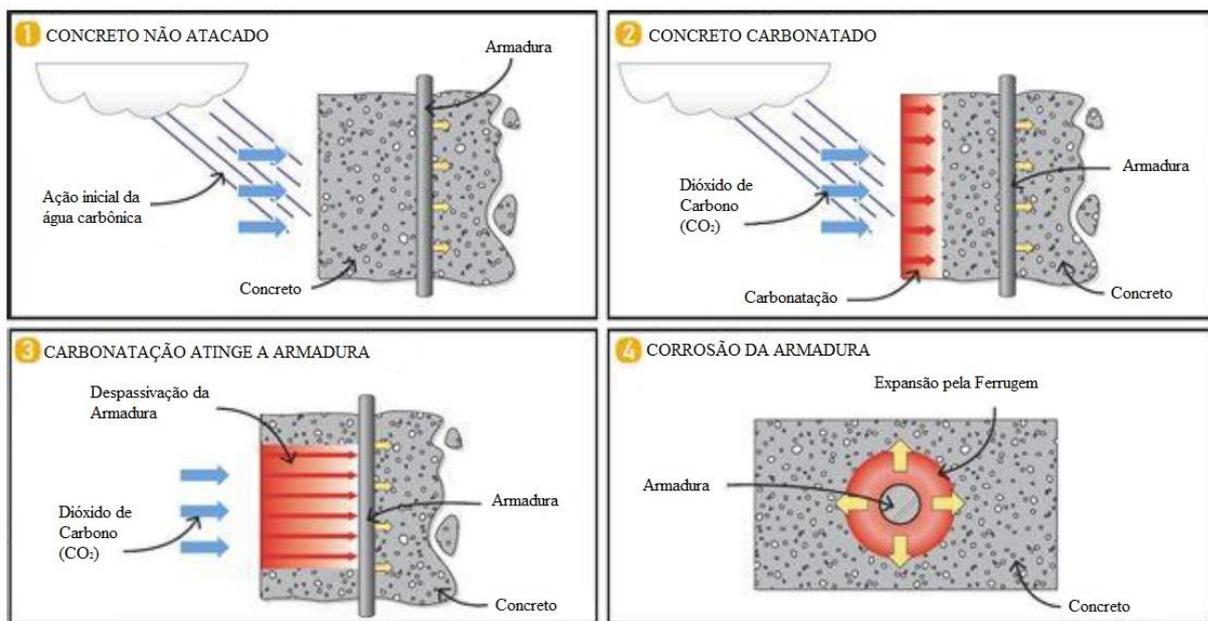
A carbonatação ocorre de maneira lenta e gradual e sua taxa é reduzida com o tempo, pois a formação dos carbonatos de cálcio nos poros do concreto acaba por colmatá-los e passam a

⁷ TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete. Research Institute, 1982.

impedir o ingresso de ar com CO₂ para o interior do concreto. Outro fator importante com relação à carbonatação refere-se à presença de umidade, pois sem umidade esse fenômeno não acontece, a água facilita a permeação do CO₂ nos poros do concreto, o que não é possível quando o concreto se apresenta totalmente seco (com umidade zero). Da mesma forma, se os poros estiverem totalmente preenchidos com água, a carbonatação também será impedida de ocorrer, pois a solubilidade/dissolução do carbonato de cálcio na água é muito baixa (CASCUDO; CARASEK, 2011). A Figura 2.10 apresenta a evolução da frente de carbonatação em uma estrutura de concreto e a Equação 2.2 apresenta a reação química básica que ocorre no interior do concreto e origina o fenômeno de carbonatação:



Figura 2.10– Representação da frente de carbonatação ao longo do tempo por Corsini (2013).



A carbonatação pode ser minimizada com a adoção de técnicas construtivas adequadas durante as fases de execução da estrutura, tais como transporte, lançamento, adensamento e cura do concreto de forma a reduzir a formação de poros no concreto, assim como as condições ambientais de exposição, devido a maior ou menor presença de CO₂ no ambiente, além também da umidade e do tipo de cimento utilizado (CASCUDO, 1997).

A redução da alcalinidade do concreto pode ser ainda proporcionada por gases ácidos presentes na atmosfera, como por exemplo, o SO₂ e o H₂S, estando este último presente em grandes concentrações no ambiente de ETEs, e, portanto, seu mecanismo de acidificação e deterioração do concreto será discutido separadamente em item subsequente.

2.3.1.4 Corrosão do Aço Induzida por Cloretos

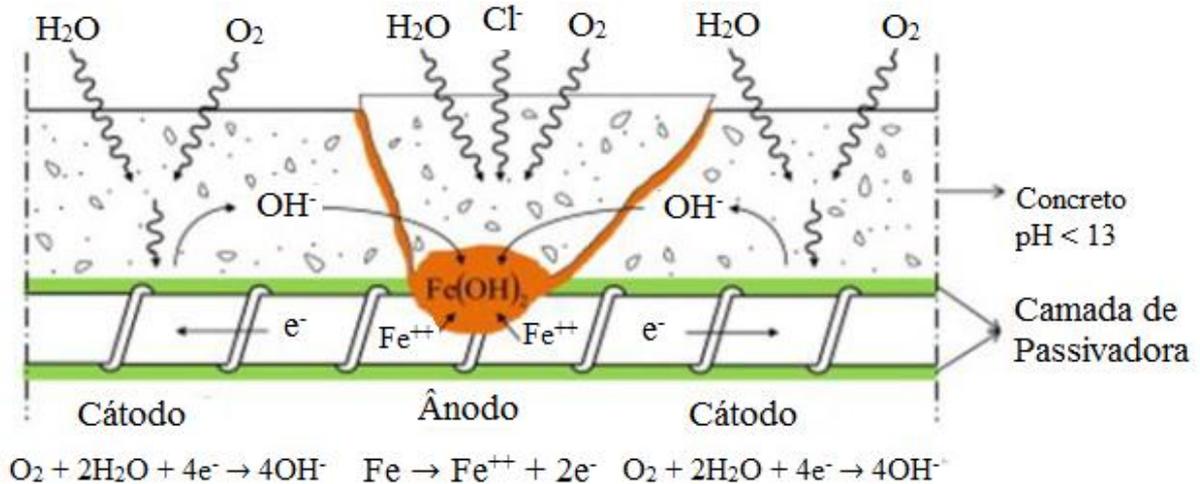
Embora o esgoto propriamente dito não apresente em sua composição teores de cloretos passíveis de agredir o concreto, esta manifestação é aqui discutida levando-se em consideração tipos de tratamento do efluente que possuem dentro de seus processos, fases de coagulação com a utilização de produtos à base de cloreto ou ainda unidades de desinfecção por cloração. Nesses casos, as concentrações de cloreto nos pontos de aplicação dos coagulantes ou desinfectantes podem ser elevadas, tornando o ambiente agressivo ao concreto. Não são aqui discutidos ataques por cloretos referentes a fatores internos do concreto, como por exemplo, a utilização de aceleradores de pega à base de cloretos.

O ataque por cloretos pode ocasionar sérios danos à armadura devido à corrosão. As normas nacionais, NBR 6118 (ABNT, 2014) e 12655 (ABNT, 2015), não estipulam a concentração em mg/L máxima de íons cloro que pode estar presente em soluções em contato com o concreto. As duas normas determinam que o teor de cloretos deva ser medido com relação à massa de cimento do concreto e em condições de alta agressividade ambiental não poderá ultrapassar 0,15% com relação à massa de cimento, limite este que é o mesmo estipulado pela norma norte americana ACI 318 (ACI, 2014).

Os cloretos penetram no concreto, de maneira geral, por meio de dois mecanismos de transporte: absorção capilar (para camadas superficiais) e difusão iônica (para camadas mais internas com a presença de um eletrólito). Após a contaminação do concreto com cloretos forma-se um tipo de sal (cloroaluminato de cálcio ou Sal de Friedel), alguns ficam adsorvidos nos poros, porém ainda constam íons livres de cloro, os grandes responsáveis pela corrosão das armaduras. De forma geral, esses íons cloreto promovem a acidificação e desestabilização da camada passivadora do aço e, posteriormente, participam ativamente do processo de corrosão (CASCUDO, 2005; SADOVSKI, 2014). A Figura 2.11, proposta por Sadovski (2014), mostra o esquema do mecanismo de deterioração causado pelos cloretos e as reações químicas que acontecem originando a “ferrugem” – óxidos de ferro.

Fatores como consumo e tipo de cimento, relação água/cimento, adensamento, presença de adições minerais, porosidade, cura e espessura do revestimento têm forte relação com a resistência do concreto ao ataque por cloretos. É importante salientar que a carbonatação também influencia no ataque por cloretos visto que o pH (proteção química do concreto) é substancialmente reduzido, expondo a armadura à despassivação (SADOVSKI, 2014).

Figura 2.11– Mecanismo corrosão por cloretos ilustrado por Sadovski (2014)



2.3.1.5 Mecanismo da Corrosão das Armaduras

Após a despassivação da armadura, seja pela ação da carbonatação, de cloretos ou outros agentes acidificantes, é iniciada a fase de propagação da corrosão que depende da existência de um eletrólito, diferença de potencial e presença de oxigênio, podendo ainda existir agentes agressivos (CASCUDO, 1997; SADOVSKI, 2014).

O eletrólito é a fase líquida contida nos poros do concreto constituída, de forma geral, de hidróxido de cálcio e/ou íons agressivos. Ele proporciona a movimentação dos elétrons dentro do concreto, principalmente devido à umidade do concreto.

A diferença de potencial (ddp) é responsável pela formação da pilha eletroquímica (ânodo + cátodo + condutor metálico). A formação da ddp pode se originar de diferença de porosidade do concreto, diferença de sollicitação mecânica no aço, concentração salina e etc.

O oxigênio forma o óxido de ferro por sua redução durante o processo eletroquímico, consumindo elétrons anódicos e produzindo hidroxilas livres que reagem com o Fe e forma os produtos de corrosão.

A partir dos deslocamentos de elétrons provocados pela pilha eletroquímica formada, os compostos reagem formando produtos de corrosão e, dentre estes produtos, podem ser citados a goetita (αFeOOH - expansiva), a lepidocrocita ($\gamma - (8\text{FeOOH}, \text{FeOCl})$ - expansiva) e a magnetita (Fe_3O_4) (CASCUDO, 2005).

2.3.1.6 Desagregação do Concreto por Biodeterioração

A biodeterioração é sem dúvida o fenômeno de deterioração do concreto mais estudado nos SES, haja vista os grandes prejuízos que ácidos de origem biogênica podem causar. São vários os tipos de microrganismos que atuam na deterioração do concreto relatados na literatura (SHIRAKAWA, 1994; DAVIS *et al.*, 1998; GU *et al.*, 1998; NICA *et al.*, 2000; GAYLARDE; GAYLARD, 2002; GIANNANTONIO *et al.*, 2009; LEEMANN *et al.*, 2010; MARQUEZ-PEÑARANDA; SANCHEZ, 2016).

Para seu desenvolvimento, microrganismos necessitam de substratos receptivos e nutrientes em quantidade suficiente para realização de suas atividades metabólicas. Desta forma, a porosidade do concreto, aliada à umidade ocasionada pelos esgotos e ainda à matéria orgânica disponível para bactérias e fungos proporcionam microclimas favoráveis à proliferação desses seres e ao desenvolvimento de processos de biodeterioração.

McNally, O'Connell e Richardson (2010) elaboraram uma pesquisa bibliográfica de forma a detalhar os processos envolvidos no ataque bioquímico do concreto. Os autores expõem que a deterioração do concreto tem como maior contribuinte as bactérias do gênero *Thiobacillus*. O mecanismo de deterioração por bactérias se inicia em fases anaeróbias do esgoto em que bactérias do gênero *Desulfovibrio* consomem sulfatos para obtenção de oxigênio disponível em proteínas e aminoácidos reduzindo-os a sulfetos. Isso acontece em ambientes em que a concentração de oxigênio está entre 0,1 a 0,5 mg/L (MONTENY *et al.*, 2000; HEWAYDE *et al.*, 2006).

Com a liberação de sulfetos no esgoto, estes reagem com hidrogênio disponível no meio formando H₂S (sulfeto de hidrogênio) dissolvido nos esgotos e em condições de turbulência, aumento da temperatura e redução do pH dos esgotos esse gás é liberado para a atmosfera. Esse processo, aliado à produção de ácidos orgânicos por fungos, faz com que o pH do meio reduza para 9 e as bactérias neutrófilas comecem a se desenvolver proporcionando uma diminuição ainda maior do pH do concreto viabilizando um ambiente favorável às bactérias acidófilas. De acordo com alguns autores, essas bactérias não oxidam o gás sulfídrico diretamente, pois formam compostos de sulfatos livres que reagem com o oxigênio e formam o ácido sulfúrico (MONTENY *et al.*, 2000; SARICIMEN *et al.*, 2003; HEWAYDE *et al.*, 2006; McNALLY; O'CONNELL; RICHARDSON, 2010). De acordo com Sawyer *et al.* (2003), o processo de desagregação do concreto se inicia a partir da formação do ácido

sulfúrico e a alteração do ambiente altamente alcalino do concreto, pode produzir ações de neutralização do meio, induzindo, assim, aos processos corrosivos das armaduras.

Quando o ácido sulfúrico entra em contato com os compostos cimentícios, promove reações conforme as equações 2.3 e 2.4 e há primeiramente a formação de gesso a partir da reação da Portlandita com o ácido sulfúrico (Equação 2.3), posteriormente esse gesso reage com o aluminato de cálcio e forma a etringita expansiva (Equação 2.4), e, se ainda houver presença de sulfatos, carbonatos e água a baixa temperaturas, o C-S-H pode originar a chamada Taumasita (SHIRAKAWA 1994; ATTIOGBE *et al.*, 1988; DAVIS *et al.*, 1998; COSTA, 2004; SOUZA, 2006; KIM; LEE, 2010; NEVILLE, 2016). A Figura 2.12 ilustra o mecanismo de degradação ocasionado por ácidos biogênicos.

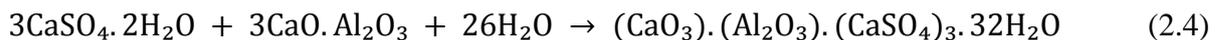
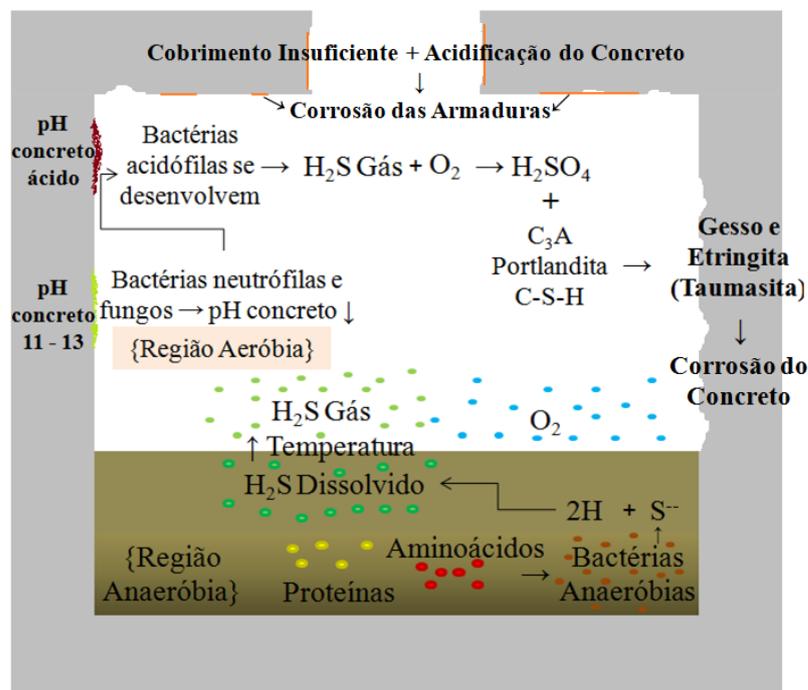


Figura 2.12– Mecanismo corrosão por ácidos biogênicos



Considerando-se o mecanismo de corrosão por ácidos biogênicos, vários fatores irão influenciar na degradação das estruturas e entre eles está a concentração de sulfetos no esgoto, pois quanto maior for essa concentração, maior será a quantidade de ácido sulfúrico

produzido. Bohn *et al.* (1993⁸ *apud* Chernicharo *et al.*, 2010) encontraram concentrações de H₂S de 4,8 mg/m³ e 3,5 mg/m³, respectivamente, para a estação elevatória de esgoto e para as unidades de pré-tratamento.

De forma geral, o concreto não é resistente à ácidos, pois ocorre a reação destes com o hidróxido de cálcio do cimento portland hidratado, formando compostos de cálcio solúveis em água que são lixiviados (GU *et al.*, 1998; NICA *et al.*, 2000; PCA, 2002; GIANNANTONIO *et al.*, 2008; LEEMAN *et al.*, 2010)

Com relação ao ataque originado por nitratos, esse pode ser causado por bactérias nitrificantes. Nos tanques de nitrificação, a amônia é oxidada em duas etapas: primeiro se transformando em nitrito e depois em nitrato, por bactérias nitrificantes das espécies *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Nitrospira* e *Nitrosococcus*, produzindo ainda íons de hidrogênio (redução do pH) e água. Após a formação do nitrato, esses íons formados reagem com bicarbonatos presentes no esgoto e formam dióxido de carbono (LEEMAN *et al.*, 2010).

Na superfície do concreto, devido aos ácidos produzidos e às reações que acontecem no biofilme nitrificante o pH reduz e provoca uma ataque ácido ao concreto. Esse ácido dissolve compostos da pasta de cimento enfraquecendo-a e ocasionando desagregação (redução do cobrimento). Leeman *et al.* (2010) expõe que, além da pasta lixiviada formada pela reação do dióxido de carbono com a Portlandita, há também a formação de uma densa camada de calcita próxima à superfície. Uma camada de gel sílica porosa e lixiviada também é formada e juntamente com a camada da calcita ajudam a evitar a entrada de dióxido de carbono no concreto, embora não seja o suficiente para proteger o concreto da corrosão, pois há uma contínua dissolução de hidróxido de cálcio e lixiviação. Porém, quando essa camada de carbonato de cálcio é removida, o concreto fica susceptível à corrosão (KALTWASSER, 1976; LEEMAN *et al.*, 2010). Da mesma forma, os ácidos originados por fungos atuam reagindo com a Portlandita, dissolvendo-a e transportando para a superfície externa do concreto (GU *et al.*, 1998; NICA *et al.*, 2000; PCA, 2002; GIANNANTONIO *et al.*, 2008; LEEMAN *et al.*, 2010).

2.3.2 Aspectos de durabilidade em estações de tratamento de esgotos

A durabilidade de ETEs está diretamente relacionada às medidas preventivas adotadas em

⁸BOHN, H.L. **Bioprocessing of organic gases in waste air.** *Symposium on Bioremediation and Bioprocessing.* In: 205th NATIONAL MEETING. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, Denver, p. 287-289, 1993.

fase de projeto e aos cuidados tomados durante a execução das estruturas. Assim, prescrições normativas quanto ao cobrimento, relação a/c e resistência do concreto relacionados à classe de agressividade a que o concreto estará exposto são bastante relevantes. Existem diversas normas internacionais que classificam a agressividade do meio e determinam parâmetros de especificação de concretos, como é o caso da norma americana ACI 318 (ACI, 2014), norma europeia EN 206-1 (EN, 2013) e a norma britânica BS 8500-1:2006 (BSI, 2006). O Brasil também trata do assunto nas normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015). Na Tabela 2.5, apresenta-se as prescrições normativas de durabilidade americanas e europeias de forma simplificada como é apresentada nas normas brasileiras. Entretanto, percebe-se que nas, normativas internacionais, a conceituação e as prescrições de durabilidade são observadas de uma forma mais complexa e com um número muito maior de ambientes agressivos considerados.

Tabela 2.5– Requisitos de projeto e execução para estruturas sujeitas a ambientes quimicamente agressivos de acordo com normas brasileiras e internacionais adaptados de: EN (2013), ACI (2014), ABNT (2014) e ABNT (2015)

Origem	Norma	Classificação Ambiental	Agressividade Ambiental	Relação a/c	Resistência Mínima do Concreto Armado (MPa)	Cobrimento (mm)	Consumo de Cimento (kg/m ³ de concreto)
Europa *	BS EN 206-1	XA 1	Ambiente com substância química levemente agressiva, de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ , pH, CO ₂ , NH ₄ ⁺ e Mg ²⁺	0,55	C30/37	50/75 BS EN 8500-1	300
		XA 2	Ambiente com substância química moderadamente agressiva, de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ , pH, CO ₂ , NH ₄ ⁺ e Mg ²⁺	0,50	C30/37		320
		XA 3	Ambiente com substância química altamente agressiva, de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ , pH, CO ₂ , NH ₄ ⁺ e Mg ²⁺	0,45	C35/45		360
EUA*	ACI 318	S0	As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Não aplicável	-	C17	50/65	-
		S1	As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Moderado	0,50	C28		-
		S2	As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Severo	0,45	C31		-
		S3	As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Muito Severo	0,45	C31		-
Brasil	ABNT 6118 ABNT 12655	IV	Classe de agressividade Muito Forte	0,45	C40	45 (lajes)/50 (vigas ou pilares)	360

*As normas europeia e americana subdividem as classes sujeitas a ambientes quimicamente agressivos. A norma americana prevê ainda a utilização de adições minerais.

Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos no sentido de proteger e prevenir o concreto contra o ataque de agentes agressivos. Kim e Lee (2010) relataram que em uma ETE do Irã, foi aplicada uma camada de epóxi na laje de fundo de um tanque de tratamento e concluíram que essa camada apresentou um grande efeito benéfico ao concreto sendo esse tipo de proteção também sugerido por Moradian *et al.* (2012). A execução de revestimentos poliméricos nas áreas superficiais expostas do concreto impede a ação física e também inibe os efeitos químicos e biológicos provocados pelo contato direto do esgoto com o concreto, garantindo assim maior durabilidade à estrutura. Moradian *et al.* (2012) recomendam ainda que deve-se ter uma atenção especial na definição da relação a/c, tipo de agregado (sugere agregados calcários) e utilizar adições minerais e fibras de polipropileno no concreto, além de aditivos antibacterianos.

Andrello e Galletto (2015) inspecionaram uma estação de tratamento de esgotos ainda em construção e que apresentava uma série de vícios construtivos, desobedecendo às normas técnicas em vigência. Como o ambiente das ETEs é agressivo, falhas construtivas potencializam a ocorrência de manifestações patológicas. Desta forma, os autores apresentaram os detalhes e especificações executivas para reparo nos pontos danificados e impermeabilização das unidades de acordo com os agentes agressivos ao qual estão expostas como, por exemplo, a especificação de revestimentos minerais poliméricos bi-componentes resistentes à abrasão para canais de condução dos esgotos e para as caixas de areia e as membranas de poliuretano para as superfícies expostas a ação de gases.

2.4 AVALIAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETODE ETEs

Rostam (1991)⁹ *apud* CASTRO, 1994) defende que o fator mais importante não é a deterioração sofrida por uma estrutura, é a forma e o grau com que isso acontece. Assim, várias metodologias são propostas e utilizadas para avaliação do grau de deterioração de estruturas de concreto armado. Muitos estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o grau de deterioração de estruturas de concreto armado no Brasil. Esses estudos se iniciaram em 1989 conforme Figura 2.13 que mostra alguns pesquisadores e as áreas pesquisadas.

⁹ROSTAM, S. **Durability of concrete structures** - The CEB - FIP approach, Colloquium on the CEB-FIP MC-90, Rio de Janeiro, RJ, pp 369-429, Agosto. 1991.

Figura 2.13 - Alguns estudos desenvolvidos para avaliação da deterioração de estruturas de concreto armado



Buscou-se na literatura alguma pesquisa ou metodologia já desenvolvida com o objetivo de avaliar as condições de durabilidade de estações de tratamento de esgotos e para isto foram consultadas três bases de dados de periódicos, são eles: Compendex (Engineering Village), SCOPUS (Elsevier) e ScienceDirect (Elsevier). A Tabela 2.6 apresenta as palavras-chave utilizadas na busca e a quantidade de periódicos devolvidos para análise. A análise desses artigos foi feita de acordo com a disponibilidade de recursos disponíveis na Base de Dados como, por exemplo, a Base de Dados SCOPUS permite a geração de arquivos do tipo .CSV em que é possível tratar os dados e excluir os artigos repetidos, assim os 9.857 artigos devolvidos pelas palavras chaves utilizadas, foram reduzidos para aproximadamente 3750 títulos. Os títulos eram então avaliados e caso fizessem referência ao tema proposto, o ABSTRACT era consultado. Ao todo foram analisados mais de 4.000 títulos diferentes e foi encontrada somente uma publicação com a proposta de avaliação quantitativa de forma a priorizar manutenções e prever períodos de manutenções nas ETEs, entretanto o texto completo do artigo não estava disponível para visualização e desta forma não foi utilizado para avaliação nesta pesquisa. O título citado é “A comprehensive approach to life extension of wastewater treatment facilities” do autor Garlich (2005) publicado no International

Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, realizado pela Universidade de Dundee do Reino Unido. Durante a análise dos resultados devolvidos pelas bases de dados, verificou-se uma vasta exploração sobre avaliações numéricas e quantitativas para substituição de redes coletoras de esgoto.

Tabela 2.6–Quantidade de artigos/periódicos obtidos de acordo com as palavras-chave nas bases de dados relacionadas

Palavras-Chaves	Quantidade de Artigos Analisados		
	SCOPUS	SCIENCEDIRECT	COMPENDEX
concrete structures AND treatment plants AND wastewater OR sewer	1424	177	130
evaluation AND concrete structures AND plants AND wastewater OR sewer	1025	190	84
evaluation AND concrete structures AND plants OR facilities AND wastewater OR sewer	1230	225	105
evaluation AND concrete structures AND treatment system AND wastewater OR sewer	1249	67	80
methodology AND concrete structures AND plants OR facilities AND wastewater OR sewer	473	100	109
methodology AND concrete structures AND treatment system AND wastewater OR sewer	480	36	76
methodology AND concrete structures AND wastewater OR sewer	830	124	51
methodology AND degradation AND concrete structures AND wastewater OR sewer	269	47	50
(methodology OR method) AND (assessment OR evaluation) AND (concrete structures) AND (plants OR facilities) AND (wastewater OR sewer)	1130	213	31
concrete structures AND sewage	1690	347	277
inspection AND concrete structures AND (facilities OR treatment OR plant) AND (wastewater OR sewage OR sewer)	24	102	41
maintenance AND concrete AND structures AND (facilities OR treatment OR plant) AND (waste water OR sewage OR sewer	33	231	60
Total Por Base de Dados	9857	1859	1094
Total Final	12810		

Após uma extensa e aprofundada pesquisa, localizou-se uma tese do autor Qasem (2011) que se intitula por “Performance Assessment Model for Wastewater Treatment Plants”. Nesse trabalho, o autor reafirma que o tema estudado ainda é pouco explorado e necessita de mais pesquisas científicas. A pesquisa de Qasem (2011) traz uma abordagem que envolve tanto o desempenho das estruturas de concreto, quanto o desempenho operacional da estação

demonstrando uma interligação entre os dois quesitos. A forma de avaliação proposta por Qasem (2011) para as infraestruturas considera o ambiente, aspectos construtivos e estabelece uma ordem de priorização baseada em pesos e subpesos, além de atributos, todos estes elencados por profissionais especialistas na área de infraestrutura de sistemas de esgotamento sanitário. A abordagem de priorização proposta por Qasem (2011) considera a relevância que determinada unidade tem para o sistema de tratamento, portanto a priorização não considera os desgastes sofridos pela unidade e a condição em que ele se encontra e sim a priorização por fator de relevância.

Embora a pesquisa de Qasem (2011) tenha ofertado uma grande contribuição a avaliação de *performance* de ETE por sua inovação e abrangência, ela possui algumas limitações que são: não considerar a ocorrência de manifestações patológicas de origens variadas e a proposta apresentada é ainda empregada somente para estações de tratamento do tipo lodos ativados, o que implicaria na aplicação da metodologia e elaboração de uma ordem de priorização para cada tipo de tratamento existente, dificultando a gestão de ativos que é a proposta desta pesquisa.

A primeira metodologia descrita na literatura brasileira para quantificação e determinação do grau de deterioração a que estrutura está exposta refere-se ao trabalho desenvolvido por Klein *et al.* (1991) e esta metodologia foi utilizada como ponto de partida para o desenvolvimento da Metodologia GDE/UnB, desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Brasília (UnB). A metodologia GDE/UnB é direcionada a edifícios usuais e para isso foi necessária adequações e inclusões de parâmetros que não foram utilizados por Klein *et al.* (1991) já que a proposta apresentada por ele previa a aplicação da metodologia em estruturas de concreto de pontes.

Em 1994, Castro elaborou sua pesquisa com o objetivo de desenvolver uma metodologia para manutenção de estruturas de forma que o grau de deterioração fosse quantificado baseado em parâmetros de manifestações patológicas mais frequentes. Nos anos seguintes foram realizadas outras pesquisas aprimorando a técnica desenvolvida por Castro (1994), assim foram encontradas na literatura 25 pesquisas que aplicaram o método proposto, sendo que destas, 3 pesquisas apresentaram melhorias no processo de cálculo do Grau de Deterioração das Estruturas (GDE): Lopes (1998), Boldo (2002) e Fonseca (2007), sendo esta última a metodologia utilizada como base para adequações no cálculo do GDE das ETEs. A Tabela 2.7 apresenta as pesquisas encontradas que aplicaram a metodologia GDE/UnB.

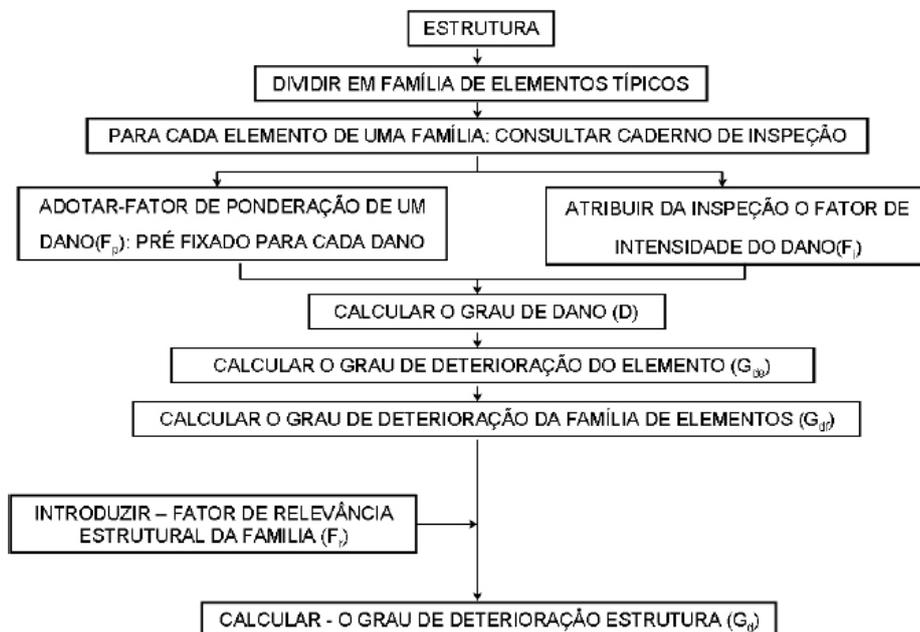
A quantidade de pesquisas já realizadas com a aplicação da Metodologia GDE/UnB mostra consolidação e popularização da mesma no meio técnico. Considerando que não foram encontradas pesquisas e metodologias objetivas e com grau de detalhamento necessário para uma avaliação precisa das estruturas de concreto armado de Estações de Tratamento de Esgotos, a adaptação da metodologia à realidade das ETes é um tanto promissora. Muitas empresas de saneamento prestam serviços regionalizados e, desta forma, possuem um patrimônio representativo destes ativos e necessitam de um controle e gerenciamento de manutenção de suas unidades, tanto por uma questão econômica, quanto por uma questão ambiental, uma vez que um eventual colapso nesses tipos de estruturas proporciona um grave impacto ambiental.

Tabela 2.7– Pesquisas realizadas que aplicaram a Metodologia GDE/UnB

Ano	Autor	Tipo de estrutura em que a metodologia foi aplicada	Quantidade de Edificações Avaliadas	Tipo de Pesquisa
1994	Castro	Edificações Educacionais	1	Dissertação
		Edificação Residencial Pública	1	Dissertação
1998	Lopes	Edifícios Comerciais Bancários	6	Dissertação
2002	Boldo	Edificações Públicas	40	Dissertação
	Botter	Edificações Educacionais	6	Dissertação
	Pessoa	Edificação Religiosa	1	Dissertação
2004	Santos Junior	Edificação Pública	1	Artigo Científico
2006	Lemos	Subsolo de Três Edifícios Residenciais	3	Dissertação
2007	Fonseca	Edificação Educacional	1	Dissertação.
	Moreira	Edificação Pública	1	Dissertação
2008	Silva	Edificação Pública	2	Dissertação
	Oliveira	Edificações Residenciais	3	Dissertação
2009	Souza	Edificação Pública	1	Dissertação
	Matos	Plataforma de Estação Rodoviária	1	Dissertação
2011	Euquéres	Pontes	12	Dissertação
	Gonçalves	Marqueses	8	Dissertação
	Neto	Edificação Comercial	1	Artigo Científico
2013	Oliveira	Edificação Educacional	1	TCC
2014	Pereira	Reservatórios de Água	12	Dissertação
	Mendes	Edificação Educacional	1	TCC
2015	Verly	Pontes	22	Dissertação
	Medeiros	Pontes	1	Dissertação
	Junior	Edificação Educacional	1	TCC
2016	Costa	Viadutos	4	TCC
	Ferreira	Pontes	1	TCC
2017	Soares	Torre de TV	1	Dissertação
Quantidade Total de Edificações com Aplicação da Metodologia GDE/UnB			135	

De maneira geral, esta metodologia proposta por Fonseca (2007) proveniente da metodologia desenvolvida por Castro (1994) segue a sequência proposta na Figura 2.14.

Figura 2.14– Fluxograma Metodologia GDE/UnB apresentado por Boldo (2002)



Primeiramente divide-se a estrutura em famílias de elementos, como por exemplo, pilares, vigas, juntas, reservatórios. A seguir, determina-se o fator de ponderação por elemento que define a importância que determinada manifestação patológica tem para o elemento, de acordo com as consequências que ela pode trazer para o elemento. Esse fator de ponderação é o F_p e varia numa escala de 1 a 5, pré-determinado de acordo com a família do elemento.

Na sequência, aplica-se o fator de intensidade do dano (F_i), esse fator classifica o quão grave a manifestação patológica é e varia de 0 a 4, mostrando então qual evolução de acordo com a Tabela 2.8.

Tabela 2.8– Fator de Intensidade do dano x Tipo de Manifestações propostos por FONSECA (2007)

Tipos de Danos	Fator de Intensidade do dano - Tipos de manifestação
Carbonatação	1-localizada, com algumas regiões com $\text{pH}<9$, sem atingir a armadura; 2-localizada, atingindo a armadura, em ambiente seco; 3-localizada, atingindo a armadura, em ambiente úmido; 4-generalizada, atingindo a armadura, em ambiente úmido;
Cobrimento Deficiente	1- menores que os previstos em norma sem, no entanto, permitir a localização da armadura; 2- menor que o previsto em norma, permitindo a localização visual da armadura ou armadura exposta em pequenas extensões; 3-deficiente com armaduras expostas em extensões significativas
Contaminação por Cloretos	2-em elementos no interior sem umidade; 3-em elementos no exterior sem umidade; 4-em ambientes úmidos.
Corrosão de Armaduras	2-manifestações leves, pequenas manchas; 3-grandes manchas e/ou fissuras de corrosão; 4-corrosão acentuada na armadura principal, com perda relevante de seção.

Continuação Tabela 2.8 – Fator de Intensidade do dano x Tipo de Manifestações propostos por FONSECA (2007)

Tipos de Danos	Fator de Intensidade do dano - Tipos de manifestação
Desagregação	2-início de manifestação; 3-manifestações leves, início de estofamento do concreto; 4-por perda acentuada de seção e esfrelamento do concreto.
Deslocamento por Empuxo	3-deslocamento lateral da parede no sentido horizontal, estável; 4- deslocamento lateral da parede no sentido horizontal, instável.
Desplacamento	2 – pequenas escamações do concreto; 3 – lascamento de grandes proporções, com exposição da armadura 4 – lascamento acentuado com perda relevante de seção
Desvios de Geometria	2-pilares e paredes com excentricidade $\leq h/100$ (h=altura); 3- pilares e paredes com excentricidade $h/100 \leq e < h/50$; 4-pilares e paredes com excentricidade $\geq h/50$.
Eflorescência	1-início de manifestações; 2-manchas de pequenas dimensões; 3-manchas acentuadas, em grandes extensões; 4-grandes formações de crostas de carbonato de cálcio (estalactites).
Falha de Concretagem	1-superficial e pouco significativa em relação às dimensões da peça; 2-significante em relação às dimensões da peça; 3-profunda em relação às dimensões da peça, com ampla exposição da armadura; 4-perda relevante da seção da peça.
Fissuras	1-abertura menores do que as máximas previstas em norma; 2-estabilizadas, com abertura até 40% acima dos limites de norma; 3-abertura excessivas; estabilizadas; 4-aberturas excessivas; não estabilizadas.
Flechas	1-não perceptíveis a olho nu; 2-perceptíveis a olho nu, dentro dos limites previstos em norma; 3-superiores em até 40% às previstas na norma; 4-excessivas.
Impermeabilização Deficiente	2-danos na camada protetora e/ou perda de elasticidade do material da impermeabilização; 3-descontinuada, degradada em alguns pontos (pontos de infiltração); 4-degradação acentuada, com perda relevante da estanqueidade.
Manchas	2-manchas escuras de pouca extensão, porém significativas (<50% da área visível do elemento estrutural); 3-manchas escuras de grande extensão (>50%); 4-manchas escuras em todo elemento estrutural (100%).
Obstrução das Juntas de Dilatação	2-perdas de elasticidade do material da junta; início de fissuras paralelas às juntas nas lajes adjacentes; 3-presença de material não compressível na junta; grande incidência de fissuras paralelas às juntas nas lajes adjacentes; 4-fissuras em lajes adjacentes às juntas, com prolongamento em vigas e/ou pilares de suporte.
Recalques	2-índícios de recalque pelas características das trincas na alvenaria; 3-recalque estabilizado com fissuras em peças estruturais; 4-recalque não estabilizado com fissuras em peças estruturais.
Sinais De Esmagamento Do Concreto	3-desintegração do concreto na extremidade superior do pilar, causada por sobrecarga ou movimentação da estrutura; fissuras diagonais isoladas; 4-fissuras de cisalhamento bidiagonais, com intenso lascamento e/ou esmagamento do concreto devido ao cisalhamento e a compressão, com perda substancial de material; deformação residual aparente; exposição e início de flambagem de barras da armadura.
Umidade	1-índícios de umidade; 2-pequenas manchas 3-grandes manchas; 4-generalizada.
Umidade na base	3-índícios de vazamento em tubulações enterradas que podem comprometer as fundações; 4-vazamentos em tubulações enterradas causando erosão aparente junto às fundações

O Grau do Dano (D) de cada elemento é calculado de acordo com o seu respectivo fator de ponderação e intensidade (F_p e F_i) por meio da utilização da Equação 2.5 ou 2.6, dependendo da intensidade do dano. Essas equações, propostas nas pesquisas do método GDE/UnB, são baseadas no modelo de vida útil de Tuutti (1982¹⁰) *apud* Fonseca (2007) para corrosão das armaduras, porém na metodologia GDE/UnB este conceito é expandido para as demais manifestações patológicas considerando que elas ocorrem em duas fases: iniciação e propagação (FONSECA, 2007). Na fase de iniciação os danos são brandos e não comprometem a vida útil da estrutura, já na fase de propagação, os danos se encontram em estágio avançado e podem comprometer tanto a funcionalidade quanto a segurança das estruturas.

Com a utilização do Grau de Dano, calcula-se o Grau de Deterioração do Elemento (Gde) utilizando-se a Equação 2.7 e logo em seguida o Grau de Deterioração da Família (Gdf) por meio da Equação 2.8, porém só são considerados os elementos com Gde superior a 15 (quinze). Conforme a relevância que esse elemento tem para a estrutura como um todo, aplica-se um Fator de Relevância Estrutural (F_r) que varia de 1 – 5 que será utilizado para o cálculo da deterioração da estrutura. A Tabela 2.9 mostra a classificação do Fator de Relevância estrutural para cada família de elementos e a Tabela 2.11 expõe a classificação dos níveis de deterioração dos elementos e da estrutura de acordo com o Grau de deterioração calculado.

Tabela 2.9– Classificação das Famílias de Elementos conforme Fator de Relevância apresentada por Fonseca (2007)

Família de Elementos	Fator de Relevância Estrutural
Elementos de Composição Arquitetônica	1
Reservatório Superior	2
Escadas/Rampas, reservatório Inferior, cortinas, lajes secundárias, juntas de dilatação	3
Lajes, fundações, vigas secundárias, pilares secundários	4
Vigas e Pilares principais	5

Aplicando-se a Equação 2.9, obtém-se o Grau de Deterioração da Estrutura (Gd). O Gde e o Gd são classificados de acordo com os níveis de deterioração propostos na Tabela 2.10.

¹⁰TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm, Swedish Cement and Concrete. Research Institute, 1982.

Tabela 2.10– Classificação dos níveis de deterioração do elemento e da estrutura apresentada por Fonseca (2007)

Nível de Deterioração	G_{de}/G_d	Ações a serem adotadas
Baixo	0-15	Estado Aceitável. Manutenção Preventiva
Médio	15-50	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (Max. 2 anos)
Alto	50-80	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (Max. 1 ano)
Sofrível	80-100	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (Max. 6 meses)
Crítico	>100	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata

Relaciona-se a seguir as equações necessárias para obtenção do Grau de Deterioração das Estruturas:

$$D = 0,8 \cdot F_i \cdot F_p \quad \text{para } F_i \leq 2 \quad (2.5)$$

$$D = (12 \cdot F_i - 28) \cdot F_p \quad \text{para } F_i \geq 3 \quad (2.6)$$

$$G_{de} = D_{máx} \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m D_i - D_{máx}}{\sum_{i=1}^m D_i} \right] \quad (2.7)$$

$$G_{df} = G_{demáx} \left[\sqrt{1 + \frac{\sum_{i=1}^m G_{de(i)} - G_{demáx}}{\sum_{i=1}^m G_{de(i)}}} \right] \quad (2.8)$$

$$GDE = \frac{\sum_{i=1}^k F_{r(i)} \cdot G_{df(i)}}{\sum_{i=1}^k F_{r(i)}} \quad (2.9)$$

Onde:

F_p é fator de ponderação;

F_i é fator de intensidade do dano;

D é Grau do Dano;

G_{de} é Grau de Deterioração do Elemento;

G_{df} é Grau de Deterioração da Família;

F_r é Fator de Relevância Estrutural;

GDE é Grau de Deterioração da Estrutura.

Esta dissertação utilizou como base a metodologia proposta por Fonseca (2007), porém foram necessárias adaptações no método proposto para aplicação em ETEs, visto que manifestações patológicas típicas de SES não foram consideradas nos fatores de intensidade propostos pelo autor por se tratar de uma obra hidráulica.

Diante de tudo o que está apresentado neste Capítulo, e ainda considerando a flexibilidade da proposta da metodologia GDE/UnB que possui a capacidade de se adequar a diferentes tipos de estruturas e ainda considera os danos sofridos pelo concreto para decidir sobre a priorização das estações de tratamento, optou-se por adotar esta metodologia no desenvolvimento desta pesquisa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia GDE/UnB subsidiada por meio de experimentos verificados em outras pesquisas, como, por exemplo, profundidade de carbonatação, microscopia eletrônica de varredura, mensuração do cobrimento existente (KIM; LEE, 2010; MORADIAN *et al.*, 2012). Assim, muitos dos ensaios a serem realizados nesta pesquisa já foram utilizados em pesquisas internacionais.

Esta pesquisa se classifica como uma pesquisa experimental e um estudo de caso onde foi avaliada uma estação com processo de Tratamento Primário Quimicamente Assistido e suas respectivas unidades de tratamento.

3.1 ESCOLHA E CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Esta pesquisa iniciou-se ainda em 2016 quando o assunto geral da dissertação ficou definido como a investigação de manifestações patológicas em ETEs. Nesta oportunidade, foram escolhidas 7 (sete) ETEs de Goiânia com o objetivo de verificar as manifestações patológicas mais comumente encontradas nessas construções, originando o trabalho elaborado por Dias, Carasek e Cascudo (2016).

Com o desenvolver da pesquisa e a partir das análises provenientes do trabalho de Dias, Carasek e Cascudo (2016), decidiu-se avaliar em detalhes uma única ETE, a estação H de Goiânia. Nas ETEs do tipo reator UASB inicialmente estudadas (ETEs B, C e J), algumas unidades foram implantadas em fibra de vidro ou em estrutura metálica, tornando, desta forma, mais interessante a avaliação de uma estação que possuísse todas as suas unidades em concreto armado.

A ETE H foi selecionada para ser o objeto de estudo principal desta pesquisa pelos motivos elencados a seguir:

- Por atender a cidade de Goiânia, trata a maior vazão de esgotos do estado de Goiás;
- É a única no estado com tratamento do tipo Primário Quimicamente Assistido;

- Por ter sido verificado, na análise prévia, ser uma estação com deterioração nas estruturas de concreto;
- Por apresentar uma diversificada quantidade de unidades de tratamento de esgotos;
- Por possuir todas as suas unidades de tratamento construídas em concreto armado.

A Tabela 3.1 apresenta os dados técnicos e operacionais da ETE H definida como objeto de estudo nesta pesquisa e a Tabela 3.2 apresenta os parâmetros do concreto adotados no projeto da estação. Em todos os projetos era indicada a utilização de cimento CP III ou CPIV e a adição de sílica ativa de 8% a 12% em substituição ao cimento (em massa).

O f_{ck} previsto em projeto foi corrigido para que pudesse ser comparado com os parâmetros esclerométricos obtidos nos ensaios, sendo denominado de f_{cmj} na Tabela 3.1, de acordo com a resistência de dosagem adotando-se um desvio padrão de 4MPa, conforme NBR 12655 (ABNT, 2015), para que pudesse servir como referencial comparativo na análise de resultados, uma vez que a resistência característica se refere à resistência aos 28 dias e devido a influência de diversos fatores como, por exemplo, a carbonatação que colmata os poros do concreto reduzindo sua porosidade e também as reações de hidratação contínuas no concreto contribuem para que a resistência aumente ao longo do tempo. Portanto, essa correção é necessária para tornar mais real a expectativa de resistência prevista em projeto em comparação com a resistência estimada durante o ensaio de dureza superficial que será realizado durante a avaliação da estação. A ETEH iniciou sua operação no ano de 2004, possui vazão de projeto de 2.290 L/s e, atualmente, trata 1.550 L/s;

Tabela 3.1 – Especificação dos concretos nos projetos estruturais da ETE estudada

ETE	Unidade de Tratamento	f_{ck} (MPa)	f_{cmj} (MPa)	Cobrimento Nominal (mm)	Relação a/c Máxima	Consumo Cimento Mínimo (kg/m ³)
H	Grade Grossa, Poço de Sucção e Tanque de Transição	35	41,6	3 – 4	0,5	350
	Tratamento Preliminar e Decantadores Primários	25	31,6	4	0,45	450
	Tanque de Lodo	35	41,6	2,5 ou 4	0,5	350

A Figura 3.1 apresenta a configuração, em planta, de todas as unidades de tratamento da Estação de Tratamento de Esgotos H. A área hachurada em azul destaca as unidades implantadas e já em operação que foram avaliadas nesta pesquisa. A Figura 3.2 mostra a localização por imagem de satélite das unidades de tratamento identificadas em balões de A

até M e seus respectivos nomes estão relacionados na Tabela 3.2.

O método para instituir os nomes dos elementos estruturais foi a adoção de duas letras que representam a unidade de tratamento, conforme explanado na Tabela 3.2 seguido de P ou L, em que P representa as paredes e L representa as lajes e a sequência de numeração faz uma rotação no sentido horário, tomando-se como elemento inicial para as paredes, o primeiro elemento à esquerda do fluxo do esgoto.

Figura 3.1– Configuração da disposição das unidades de tratamento na área da ETE H

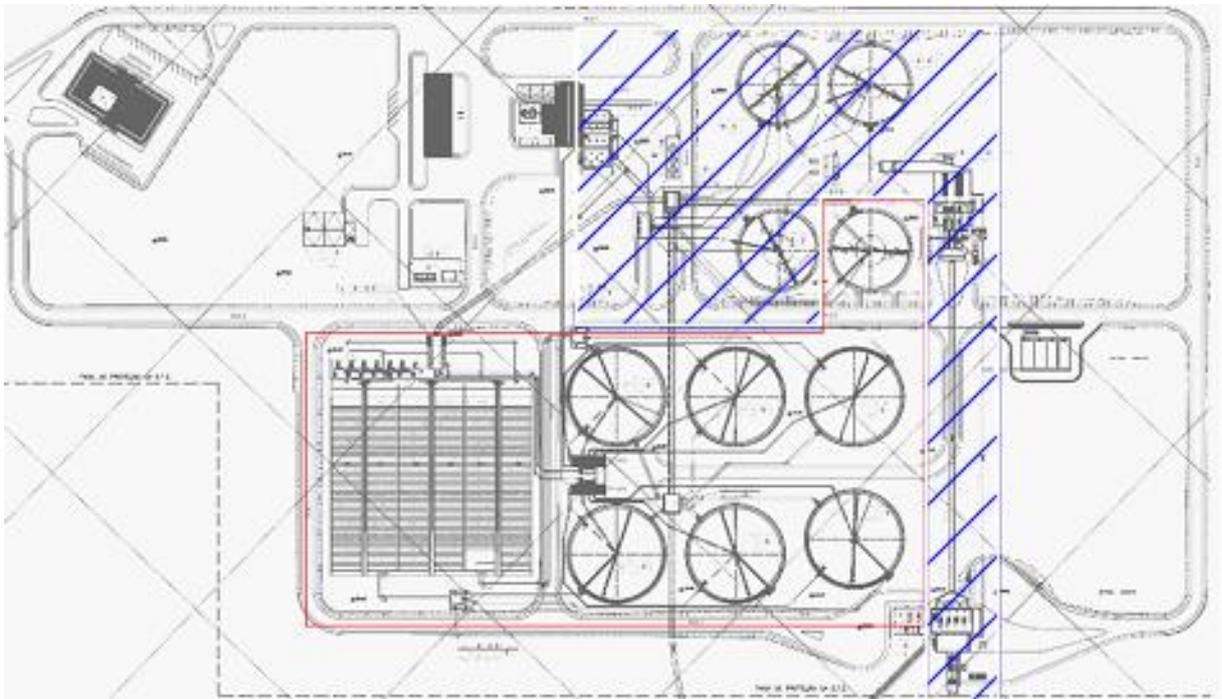


Figura 3.2 – Disposição das unidades de tratamento existentes na ETE H



Tabela 3.2 – Nomes e siglas de identificação das unidades de tratamento da ETE H

Unidade(s) de Tratamento	Sigla	Unidade(s) de Tratamento	Sigla
Grade Grossa	GG	Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários	TD
Poço de Sucção	PS	Decantador Primário 1	D1
Tanque de Transição	TT	Decantador Primário 2	D2
Canal de Chegada	CC	Decantador Primário 3	D3
Grade Fina e Canal de Condução para o Desarenador	GF	Tanque de Efluente Final	TF
Caixa de Areia - Desarenador	CA	Tanque de Armazenagem de Lodo	TL
Calha Parshall	CP		

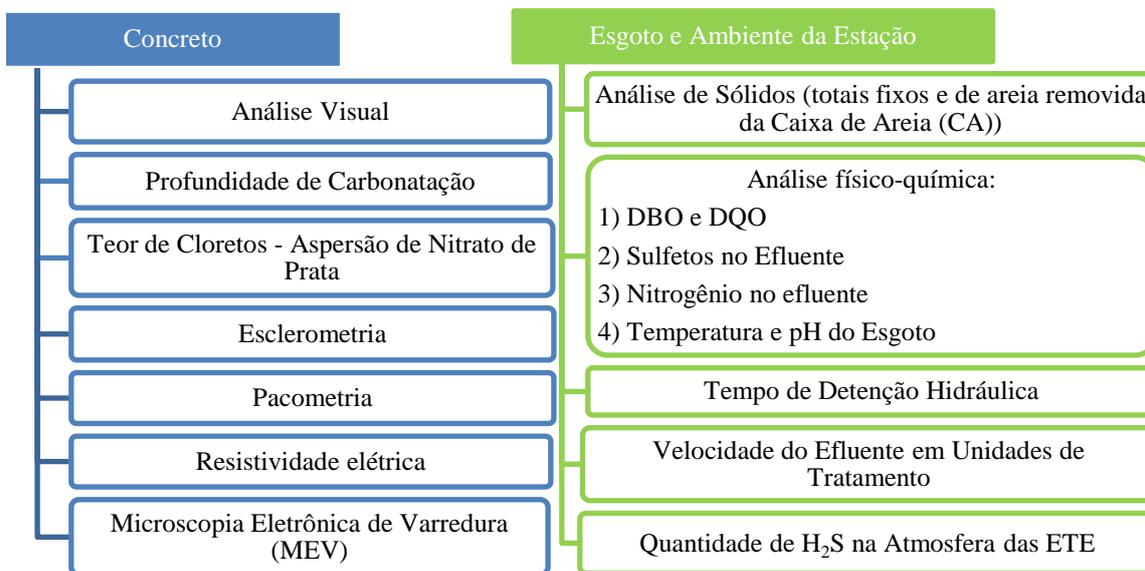
Dentre todas as unidades da estação, somente duas não foram avaliadas: O Tanque de Armazenagem de Lodo 2 e o Poço de Sucção da Elevatória de Lodo que conduz o sólidos removidos nos decantadores primários para o Tanque de Armazenagem de Lodo. Nessas duas unidades não foi possível realizar nenhum tipo de experimento. No Tanque de Armazenagem de Lodo 2, todas as paredes são revestidas com uma espessa camada de argamassa impedindo a realização dos ensaios previstos. No Poço de Sucção da Elevatória de Lodo, a mesma é enterrada e somente uma parede externa poderia ser avaliada. Nem internamente foi possível realizar uma análise visual devido aos resíduos removidos durante o tratamento estarem recobrimo as paredes. Assim, a recomendação é de que em momento oportuno, numa possível parada, seja realizada uma limpeza das unidades e uma inspeção detalhada de seus elementos estruturais.

É importante ressaltar que a estação de tratamento possui 14 anos de operação e não passou por nenhum processo de manutenção intenso nas estruturas de concreto. As reformas realizadas se resumiram à revitalização da pintura e uma impermeabilização da caixa de areia que já está programada para ser recuperada, uma vez que já apresenta desgastes.

3.2 MÉTODOS EMPREGADOS

A Figura 3.3 relaciona os ensaios e também os parâmetros analisados no concreto das estruturas de ETEs e também no efluente. Esses ensaios ofereceram um suporte para uma melhor avaliação do estado de conservação da ETE e ainda contribuíram para redução do teor de subjetividade que qualquer metodologia pode trazer arraigada em si.

Figura 3.3– Ensaios e Parâmetros a serem avaliados no concreto das estruturas e no esgoto.



3.2.1 Métodos aplicados para diagnóstico do concreto

Nesta seção são descritos os métodos aplicados em ensaios diagnósticos do concreto, conforme ilustrado na Figura 3.3. Ressalta-se que o ambiente confinado combinado com a dificuldade de acesso ao ambiente interno das unidades proporcionou uma avaliação de acordo com as condições de acessibilidade da estrutura. Assim, alguns ensaios foram realizados somente na superfície externa do elemento estrutural da unidade. Unidades com maior flexibilidade operacional (com mais de uma unidade funcionando em paralelo) como, por exemplo, os desarenadores, com três unidades, e os decantadores, com também três unidades em paralelo, tiveram um de seus módulos analisados internamente porque não estavam em operação.

Como a presente pesquisa está embasada na Metodologia GDE/UnB, os ensaios diagnósticos do concreto buscaram fornecer subsídios para aplicação dos fatores de intensidade das estruturas. A Tabela 3.6 apresenta os danos e as formas de análise envolvidas, sendo que os danos que possuíam um ensaio passível de ser aplicado de forma prática e com resultados relevantes estão descritos com mais detalhes neste subitem. Além das avaliações descritas na Tabela 3.3, foi realizado ainda o ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, conforme NBR 7584 (ABNT, 2012).

Optou-se sempre que possível pela execução de ensaios não-destrutivos ao concreto com

intuito de preservar a condição em que a ETE se encontra e causar o menor dano possível à estrutura, pois como o ambiente das estações já é de uma classe de agressividade bastante elevada, ensaios destrutivos podem criar pontos vulneráveis para degradação da ETE.

Tabela 3.3 - Danos previstos na metodologia GDE/UnB adaptada para ETEs e ensaios para auxílio na avaliação

Manifestação Patológica ou Dano	Ensaio
Carbonatação	Avaliação da profundidade carbonatada com fenolftaleína
Cobrimento Deficiente	Pacômetro – Medida do Cobrimento da Armadura
Contaminação por Cloretos	Aspersão de Nitrato de Prata, MEV
Corrosão das Armaduras	Resistividade elétrica
Desagregação	Observação visual
Deslocamento por Empuxo	Observação visual
Desvios de Geometria	Observação visual
Eflorescências	Observação visual
Falhas de Concretagem	Observação visual
Fissuras	Observação visual
Desplacamento	Observação visual
Manchas	Observação visual
Sinais de Esmagamento	Observação visual
Umidade	Observação visual
Flechas	Observação visual
Erosão	Observação visual

3.2.1.1 Análise Visual

A análise visual é sem dúvidas a mais simples das vistorias realizadas nas estruturas de concreto e também uma das mais importantes, pois a identificação visual de manifestações contribui de forma significativa para elaboração de diagnóstico de boa parte das manifestações patológicas. Reygaerts (1980¹¹) *apud* Guimarães (2003) cita que diagnósticos podem ser realizados por meio de exames visuais do desgaste, complementados pela realização de ensaios em campo e ainda aprimorados por meio de ensaios de laboratório. Da mesma forma, Ruano (1997¹²) *apud* Guimarães (2003) salienta que o diagnóstico apresenta três fases e dentre elas encontra-se a pré-diagnose, em que a inspeção visual estabelece a forma de atuação, para posteriormente recolher informações de forma a permitir a compreensão do todo e, por fim, elaborar o diagnóstico da situação referente a patologias nas edificações.

Assim, como já apresentado anteriormente, a dificuldade de acesso às unidades impediu um

¹¹ REYGAERTS, J. Diagnostic des cas de pathologie du bâtiment. C. S. T. C. Revue. N.4. 1980

¹² RUANO, R. P. Importancia de uma metodologia de investigación em los trabajos de patologia, diagnóstico y rehabilitación de edificios. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6. Porto Alegre-RS, 1997. Anais. Porto Alegre, 1997.

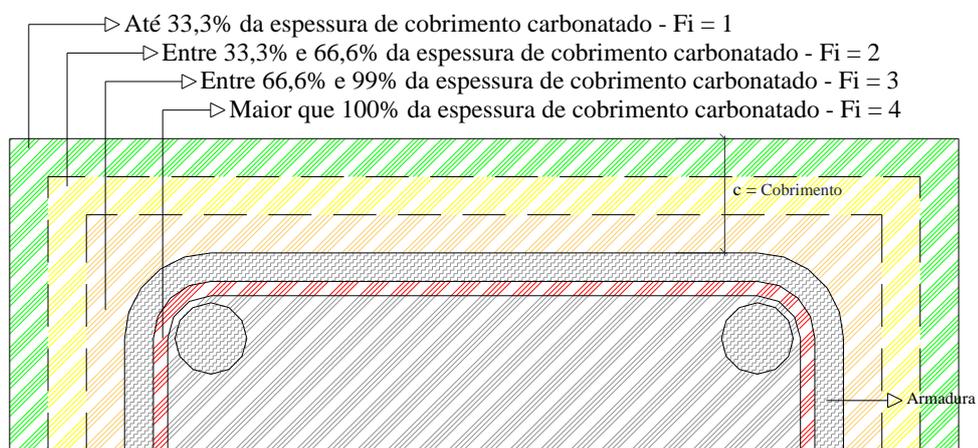
diagnóstico quantitativo e qualitativo em todos os elementos estruturais. Desta forma, a análise visual, mesmo sem acesso, foi realizada por meio de fotografias, onde era possível, para uma melhor avaliação das estruturas da estação de tratamento. A face inferior das lajes, por exemplo, quando o local era inacessível, foram vistoriadas inserindo-se a câmera fotográfica dentro da unidade e fotografando ou filmando as condições em que se encontrava. Há um grande acervo fotográfico desta pesquisa que serve também como histórico das condições de conservação da estação quando vistorias posteriores forem realizadas e assim puder ser verificada a evolução do grau de deterioração da ETE.

3.2.1.2 Profundidade de Carbonatação

A profundidade de carbonatação é um experimento de simples execução. Existem vários marcadores de pH para medir a profundidade carbonatada. Neste trabalho, foi aplicada solução de fenolftaleína nas perfurações executadas nos elementos estruturais do concreto da estação. Por ser um indicador de pH, a fenolftaleína faz com que locais onde o pH é maior que 12 transforme-se na cor rósea, destacando onde o CO_2 ainda não reagiu com o hidróxido de cálcio presente no concreto. A espessura superficial que permanece com a coloração típica do concreto é mensurada e origina a Profundidade Carbonatada.

Este ensaio fornece subsídio para a aplicação do fator de intensidade referente ao Dano “Carbonatação” na metodologia GDE/UnB. Para análise deste resultado, consideraram-se os resultados obtidos no ensaio de pacometria (medida da profundidade de cobrimento do concreto) para verificação do avanço da frente de carbonatação e assim a avaliação foi realizada adotando-se os Fatores de Intensidade ilustrados na Figura 3.4.

Figura 3.4– Avaliação do Fator de Intensidade (F_i) referente ao “dano” carbonatação.



As faces superiores das lajes possuem proteção mecânica com camadas de concreto e argamassa, além de impermeabilização contra infiltrações com manta asfáltica. Essa proteção dificulta a penetração do CO_2 , assim, considerou-se que a carbonatação era bastante restrita e desta forma foi aplicado Fator de Intensidade “0”. Somente nos locais das lajes em que a proteção já estava danificada, realizou-se o ensaio de carbonatação normalmente e aferiu-se a medida da espessura carbonatada. Nas unidades enterradas, não foi possível realizar o ensaio para aferição da profundidade carbonatada.

Foi realizada a fratura da superfície de concreto por meio de marteleto. Devido às dificuldades de acesso aos elementos estruturais, esse ensaio foi realizado na superfície externa de todas as unidades de tratamento, sendo que somente nas paredes GGP1 e GGP2 da Grade Grossa e CAP2 da Caixa de Areia, foi possível realizá-lo internamente devido à possibilidade de acesso no momento da realização do ensaio e, posteriormente, seguiu-se o procedimento comumente adotado na realização desse ensaio.

A Figura 3.5 ilustra a sequência de realização do ensaio. A parte do concreto que já carbonatou e apresenta um pH inferior a 9 fica incolor e a parte não carbonatada adquire uma cor vermelho-carmim.

Figura 3.5– Realização do Ensaio de Carbonatação



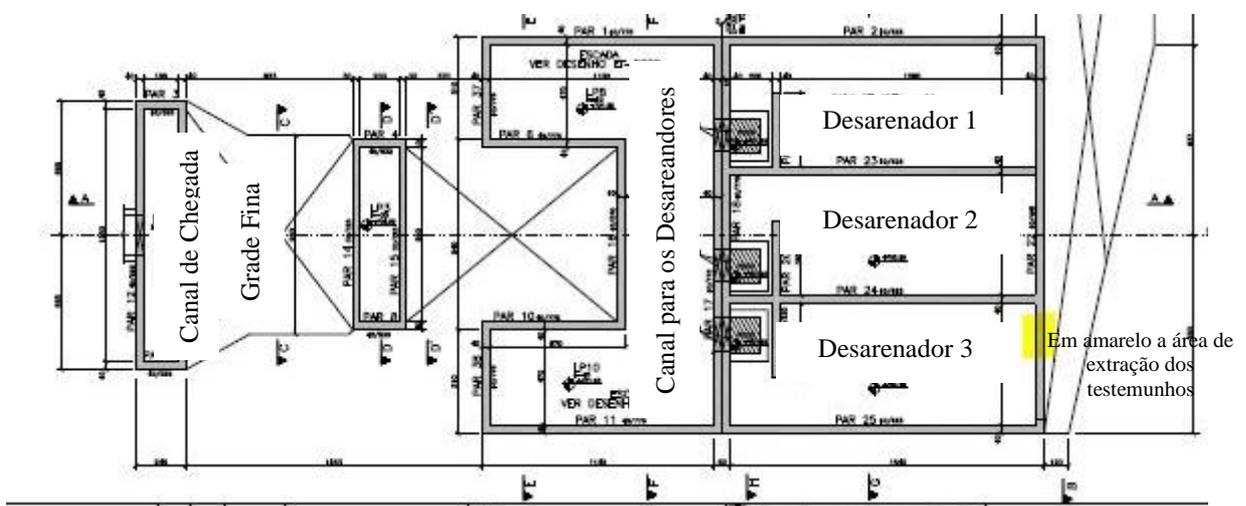
3.2.1.3 Extração de Testemunhos

O procedimento experimental seguiu as prescrições da norma NBR 7680-1 (ABNT, 2015) para extração de testemunhos de estruturas de concreto. Após a extração dos testemunhos, os corpos de prova foram transportados embrulhados em papel filme para o laboratório LABITECC da UFG onde foi efetivado o rompimento e guardadas as amostras em dessecador à vácuo com sílica gel.

A extração de testemunhos teve como objetivo principal avaliar a presença de cloretos no interior do concreto, portanto só foram extraídos testemunhos em locais específicos com potencial ataque por cloretos. Entretanto, de dois furos executados (corpo de prova 1 e 2) foram ainda extraídas quatro amostras (duas de cada corpo de prova) a serem utilizadas em análises do MEV, para esta análise o corpo de prova 3 foi descartado por ter sido contaminado ao cair dentro de uma canaleta com esgoto durante a extração.

Na ETE H, o único local em que há utilização de produtos à base de cloretos no processo de tratamento é no desarenador, local onde ocorre a aplicação do coagulante cloreto férrico (FeCl_3). Assim, foi realizado estudo do projeto estrutural (Figura 3.6) dos elementos estruturais localizados próximos ao ponto de aplicação do coagulante e definida a parede CAP2 do desarenador (PAR 22 do Projeto Estrutural) como área amostral. Foram extraídos 3 (três) testemunhos (corpos de prova) de concreto e realizado o rompimento dos testemunhos por tração por compressão diametral. Após a extração, os vazios gerados foram preenchidos com argamassa. Na Figura 3.6 está marcado em amarelo o local da extração dos testemunhos.

Figura 3.6– Projeto estrutural das unidades de tratamento primário



A Figura 3.7 mostra o detalhamento da armadura para auxiliar na definição do local da extração para não comprometer a estabilidade estrutural e não causar danos à armadura, além disso, foi realizado ainda o ensaio de pacometria de forma a identificar os locais onde estavam localizadas as armaduras. A Figura 3.8 mostra a parede CAP2 do desarenador (PAR 22 do Projeto Estrutural) de frente com a área de extração do testemunho em amarelo. Salienta-se que este local é de difícil acesso e a base da caixa ainda possui inclinação, dificultando a montagem da estrutura de andaimes para execução da extração. Outra dificuldade quanto a

extração sem danos foi a alta taxa de aço verificada no local, mesmo realizando a pacometria, o aço foi atingido, porém não houve dano ao mesmo.

Figura 3.7 – Detalhamento do projeto estrutural

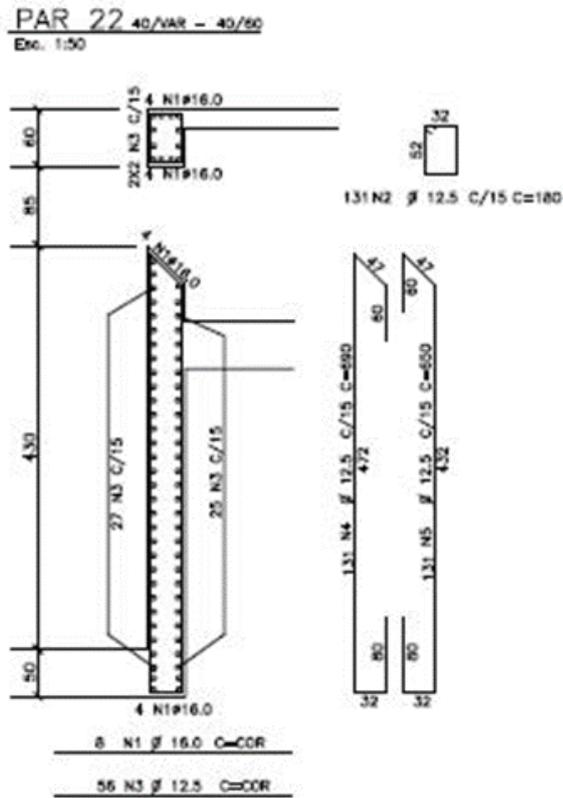


Figura 3.8 – Parede CAP2 (PAR22) do Projeto Estrutural



As Figura 3.9 a Figura 3.12 ilustram de forma sequencial do procedimento adotado para extração dos testemunhos.

Figura 3.9 – Localização das armaduras *in loco*

Figura 3.10 – Posicionamento do equipamento



Figura 3.11 – Extração do testemunho



Figura 3.12 – Local da extração do testemunho



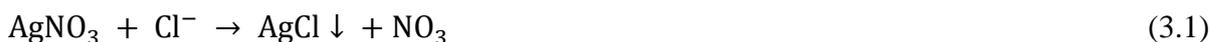
A extração dos testemunhos foi realizada sem que houvesse rompimento de nenhum elemento da armação do concreto. Quando o operador percebia que havia atingido a armadura, o corte era paralisado e o corpo de prova extraído. Desta forma, todos os testemunhos extraídos correspondem à camada de cobertura. Inicialmente, acreditava-se que seria possível extrair o corpo de prova de forma integral, sem danos à estrutura, entretanto devido à grande proximidade entre as barras de aço da armadura, optou-se por não danificar os vergalhões e por esse motivo.

3.2.1.4 Avaliação da penetração de cloretos no concreto – Aspersão de Nitrato de Prata

A condição de verificação da existência de cloretos livres pela aplicação do Nitrato de Prata e sua eficiência devem ser avaliadas conforme a concentração da solução de AgNO_3 , o pH do meio, a espessura carbonatada e o teor de cloretos no concreto, pois todos esses fatores podem influenciar nos resultados (REAL *et al.*, 2015).

Os cloretos livres (Cl^-) reagem com o Nitrato de Prata formando cloreto de prata, um pó branco, conforme reação apresentada na Equação 3.1. Entretanto, se o concreto estiver

carbonatado, a prata ainda pode reagir com o carbonato e também formar um pó branco. Equação 3.2, proporcionando uma análise errônea dos resultados, assim, é importante combinar os resultados de avaliação da carbonatação e de aspensão de Nitrato de Prata para avaliação de cloretos (REAL *et al.*, 2015). Se a região onde é aspergida a solução de Nitrato de Prata não possui cloretos, ou possui cloretos combinados, ocorre a precipitação do óxido de prata, com coloração mais voltada para o marrom.



Há uma grande divergência entre os estudiosos sobre a utilização do nitrato de prata como indicador de cloretos com relação a qual teor de cloretos livres que causam mudança de coloração, entretanto, esse método tem sua contribuição no sentido de indicar se a frente de íons cloro já alcançou a armadura.

Este ensaio foi realizado somente na unidade em que ocorre, durante o processo de tratamento, a aplicação de produtos à base cloro, como, por exemplo, em pontos de aplicação de coagulantes e desinfetantes. Conforme verificado na literatura, os teores de cloreto típicos de esgotos não apresentam grandes problemas, exceto nos dois casos citados anteriormente. A dosagem de cloreto férrico (coagulante) prevista em projeto é de 20 mg/L. De acordo com os dados de projeto da ETE, o cloreto férrico é um material corrosivo com pH de 3,5.

Foram realizadas as medições tanto do avanço dos íons cloro para o interior do concreto, quanto da profundidade de carbonatação do elemento estrutural, por ser a carbonatação um fator de grande influência no resultado deste ensaio.

Posteriormente ao rompimento, foi aplicada a solução de Nitrato de Prata e de Fenolftaleína (em pedaços amostrais diferentes complementares) para avaliação da frente de íons cloreto e de dióxido de carbono, respectivamente. Como os resultados mostraram que a espessura carbonatada e a espessura destacada pela aspensão de nitrato de prata foram um tanto coincidentes, concluiu-se nessa análise que a espessura mais clara da amostra analisada com nitrato de prata pode ser um falso-positivo (Figura 3.13) e, portanto, as amostras também foram analisadas no MEV para verificar a presença de cloro na amostra.

Figura 3.13 – Comparação das espessuras carbonatadas com avaliação da frente de íons cloro por aspersão de nitrato de prata



3.2.1.5 Dureza superficial – Ensaio Esclerométrico

O esclerômetro de reflexão avalia a dureza superficial do concreto fornecendo informações sobre a qualidade superficial do concreto endurecido. O ensaio consiste na utilização de uma massa-martelo impulsionada por uma mola que se choca sobre a área analisada e fornece o índice esclerométrico. O procedimento para execução desse ensaio é estabelecido na NBR 7584 (ABNT, 2012).

De acordo com a NBR 7584 (ABNT, 2012), diversos fatores podem influenciar os resultados do ensaio de esclerometria, tais como: o tipo de cimento e agregado, o tipo de superfície e as condições de umidade, a carbonatação, a idade do concreto e as pressões aplicadas durante a realização do ensaio. Embora este ensaio apresente suas limitações devido à quantidade de fatores que podem influenciar seus resultados, de maneira comparativa ele fornece uma informação relevante sobre as condições da dureza superficial das unidades e de maneira indireta e estimada, sobre a resistência à compressão do concreto. O equipamento utilizado para realização do ensaio foi o esclerômetro Schmidt-Hammer da PROCEQ, conforme Figura 3.14.

A resistência à compressão é sem dúvida a propriedade mais importante em estruturas de concreto armado e ela pode ser determinada de forma não destrutiva e indiretamente por meio do ensaio de esclerometria. Ressalta-se que o ensaio de esclerometria apenas fornece uma informação subjetiva, mas que se utilizada de forma comparativa pode contribuir com interpretações que sejam relevantes na análise das condições de homogeneidade e de durabilidade das estruturas da ETE. Portanto, não se pretende com o ensaio de esclerometria

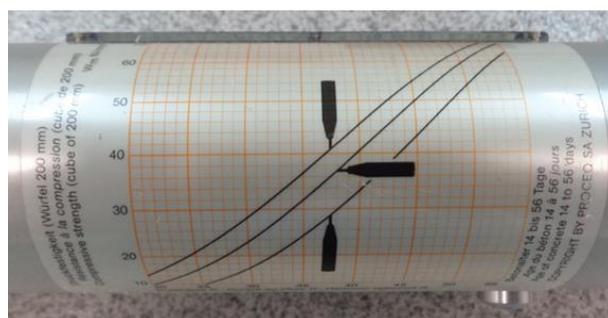
afirmar de forma categórica qual a resistência do concreto da estação, pois para isso seria necessária uma análise de forma direta, baseada nas normativas com essa finalidade garantindo maior confiabilidade nos resultados. Malhotra e Carino (2004) afirmam que a variação por consenso da precisão da estimativa de resistência à compressão obtido por meio do índice esclerométrico em ambiente controlado de laboratório é de 15% a 20% e em estruturas de concreto no campo pode variar até 25%.

Assim, para que se possa verificar esta característica do concreto das ETEs, o índice esclerométrico obtido em cada parede da ETE foi convertido para fornecer a resistência à compressão estimada, de acordo com a curva característica fornecida pelo aparelho esclerômetro. A curva característica é fornecida pelo fabricante do aparelho, com base nos concretos da localidade onde o aparelho foi desenvolvido. Entretanto, para fins comparativos na mesma obra, a resistência medida não necessariamente fornece uma medida exata, mas apenas um referencial para que possam ser diagnosticadas possíveis regiões com maior probabilidade de uma maior porosidade superficial.

A curva do aparelho para conversão do índice esclerométrico em resistência a compressão, deve sempre que possível, ser elaborada no país onde o concreto está sendo confeccionado, uma vez que uma série de parâmetros podem influenciar no delineamento da mesma. Entretanto, como não foi possível elaborar nessa pesquisa a curva característica específica para a obra em avaliação, adotou-se a mesma com o objetivo de comparar a estrutura de concreto de uma unidade com outra e verificar possíveis relações entre a deterioração sofrida pela unidade e o desempenho da resistência superficial do mesmo.

A Figura 3.15 apresenta o gráfico utilizado para conversão do índice esclerométrico (eixo horizontal) em resistência à compressão (eixo vertical).

Figura 3.14 – Esclerômetro Schmidt-Hammer Figura 3.15 – Gráfico para conversão do Índice Esclerométrico em Resistência à Compressão



3.2.1.6 Pacometria – Medida da Espessura de Cobrimento

A pacometria é um ensaio não destrutivo que fornece informações sobre a espessura de cobertura do concreto armado, o diâmetro (bitola) e a localização da armadura. Trata-se de um ensaio de simples realização e que fornece subsídio com relação ao aspecto de durabilidade do concreto. Além disso, a pacometria auxilia na interpretação de outros ensaios, tais como a avaliação da penetração de cloretos e a profundidade de carbonatação, além de auxiliar na extração de testemunhos sem danos à armadura.

O ensaio de pacometria foi realizado com o equipamento Bosh Wallscanner D-TECT 150 (Figura 3.16) esse aparelho consegue detectar armaduras com profundidades de até 15 cm no interior do concreto, além de detectar também plásticos, metais não-ferrosos, subestruturas de madeira e cabos energizados. A precisão da medida é de, aproximadamente, mais ou menos 5 mm, sendo que cabos energizados pode ser detectados até uma profundidade de 60 mm.

Figura 3.16 – Pacômetro Eletrônico



Para que a leitura das profundidades seja realizada, é necessário que a superfície seja plana, sem desníveis na área a ser escaneada. Não são informadas restrições para o aparelho pelo fabricante.

Adotou-se uma faixa de 60 cm para aferição dos cobrimentos por elemento estrutural então, os valores informados pelo equipamento foram anotados e, posteriormente, calculada a média de cobertura para o elemento. Locais onde o equipamento informou cobrimentos iguais a zero e não era observada a exposição da armadura, foram considerados como erros de medição e, por esse motivo, eles foram descartados.

3.2.1.7 Resistividade Elétrica

A corrosão é uma das manifestações patológicas mais corriqueiramente encontradas em ETEs, por isso é importante que se obtenha parâmetros que forneçam informações quanto aos níveis e taxas de corrosão já atingidos pela estrutura. Assim, a resistividade elétrica é um experimento não destrutivo que fornece subsídios para investigação sobre a corrosão das armaduras.

A resistividade elétrica é o inverso da condutividade elétrica e, desta forma, pode correlacionar a probabilidade de corrosão do concreto armado. Concretos com a armadura muito corroída e em meio úmido apresentam alta condutividade e, conseqüentemente, baixíssima resistividade.

De acordo com Santos (2006), vários fatores influenciam na resistividade elétrica do concreto, são eles:

- Características do concreto: relação a/c, tipo e quantidade de agregados, consumo de cimento, adições minerais, aditivos químicos, grau de hidratação do cimento;
- Características ambientais: temperatura e umidade relativa;
- Presença de agentes agressivos: cloretos, sulfetos e gás carbônico.

Além disso, a resistividade dependerá do teor de umidade do concreto, da permeabilidade e do grau de ionização do eletrólito do concreto (CASCUDO, 1997).

Existem dois métodos para avaliação da resistividade elétrica, citados por Cascudo (1997). O primeiro é normalizado internacionalmente pela ASTM G 57 (ASTM, 2012) e conhecido como método de Wenner, este método é mais frequentemente utilizado para medir resistividade do solo, porém sofreu adaptações para medições *in loco* no concreto, é um experimento prático, de simples execução e não-destrutivo. Já o segundo é normatizado pela ABNT por meio da NBR 9204 (ABNT, 2012), trata-se da resistividade elétrico-volumétrica do concreto. Para esta pesquisa foi utilizado o método de Wenner utilizando-se o equipamento RESI Widerstandsmesses – Resistivity Meter da PROCEQ, conforme Figura 3.17.

Figura 3.17 – Equipamento utilizado para determinação da resistividade elétrica do concreto



Esse ensaio foi realizado em cada elemento estrutural em que era possível ter acesso e todos os resultados são referentes à face interna do elemento estrutural. Devido às dificuldades de acessibilidade às faces internas do elemento estrutural, esses pontos amostrais estavam localizados em regiões próximas entre si. Nos locais onde seria medida a resistividade, enxarcava-se o concreto antes do início do ensaio.

3.2.1.8 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) proporciona o conhecimento sobre a estrutura morfológica dos produtos existentes no interior do concreto.

O ensaio foi realizado no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) da UFG com o equipamento Jeol JSM-6610. Esse equipamento pode ampliar as imagens em até 300.000 vezes e ainda realizar microanálises químicas quando utilizado também o Espectômetro de Dispersão de Energia (EDS). Foram utilizadas amostras secas em estufa por 24h a $55 \pm 5^\circ\text{C}$, com tamanho aproximado de 2 cm x 1 cm x 1 cm, armazenadas em dessecador com sílica gel até o momento de realização das análises.

Foram extraídos três testemunhos (Figura 3.18), da parede CAP2 do desarenador (PAR 22 do Projeto Estrutural), conforme mostrado anteriormente na Figura 3.10, durante a extração tomou-se o cuidado de não danificar a armadura, portanto, os testemunhos extraídos referem-se ao revestimento. Duas amostras retiradas para análise no MEV estavam localizadas próximas à superfície entre 0 e 10 mm e as outras duas entre 40 e 50 mm distante da face da superfície, conforme esquema representado na Figura 3.19. A Figura 3.20 apresenta as amostras analisadas no MEV obtidas do testemunho 1, sendo renomeadas como amostra 1.1 a amostra na região carbonatada e amostra 1.4 a amostra na região não carbonatada do CP 1.

Figura 3.18 – Corpo de Prova extraído



Figura 3.19 – Localização da extração das amostras para análise no MEV

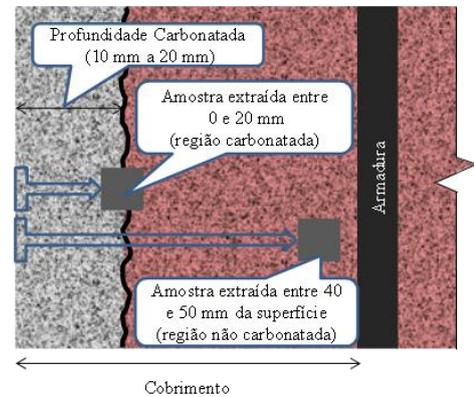
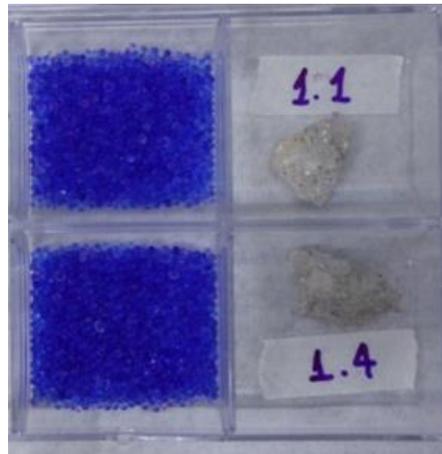


Figura 3.20 – Amostras para análise do MEV preparadas e armazenadas com sílica



3.2.1.9 Plano de amostragem para os ensaios

Diante da exposição dos ensaios que auxiliaram para que os objetivos desta pesquisa fossem alcançados e ainda para explicar de maneira mais didática a realização dos mesmos, a Tabela 3.5 apresenta um resumo das amostras e inspeções realizadas e, de forma mais detalhada, foi elaborada a Tabela 3.5 que expõe o plano de amostragem para realização dos ensaios no concreto. É importante ressaltar que os ensaios aqui realizados tem caráter auxiliar na avaliação das estruturas e por este motivo a quantidade de amostras definidas não tem a função de realizar grandes amostragens e sim dar subsídio ao técnico no decorrer da aplicação da metodologia GDE/UnB.

Tabela 3.4 – Quantidade de amostras e inspeções realizadas

Quantidade de Unidades de Tratamento da ETE	13
Quantidade Total de Elementos Estruturais	45
Ensaio	Quantidade de amostras e aspectos de realização dos ensaios
Profundidade de Carbonatação	1 amostra por elemento estrutural em que foi possível realizar a análise
Pacometria	Medidas do cobrimento na região de 60 cm de cada elemento estrutural
Ataque por Cloretos – Aspersão de Nitrato de Prata	3 amostras na parede CAP2 do desarenador (PAR 22 do Projeto Estrutural)
MEV	2 amostras da parede CAP2 do desarenador (PAR 22 do Projeto Estrutural)
Ensaio de Esclerometria	1 amostra composta por 16 pontos cada, de acordo com NBR 7584 (ABNT, 2012), em cada elemento estrutural em que foi possível realizar a análise
Resistividade Elétrica	3 leituras em cada elemento estrutural em que foi possível realizar a análise

Tabela 3.5 –Plano de amostragem para realização dos ensaios no concreto

Ensaio e Experimentos Diagnósticos no Concreto	Grade Grossa					Poço de Sucção					Tanque de Dissipação					Canal de Chegada			Grade Fina e Canal de condução para o Desarenador			Desarenador					
	L1	P1	P2	P3	P4	L1	P1	P2	P3	P4	L1	P1	P2	P3	P4		P1	P2	P3	L1	P1	P2		P1	P2	P3	P4
Nome do Elemento Estrutural																											
Análise Visual	I/E	I	I	I/E	I	I/E	I	I/E	I/E	I/E	I/E	E	E	E	E	NÃO POSSUI LAJE SUPERIOR	I/E	I/E	I/E	E	I/E	I/E	NÃO POSSUI LAJE SUPERIOR	E	I/E	I/E	I/E
Carbonatação	NR	I/E	I	E	NR	E	NR	NR	E	E	NR	NR	NR	NR	NR		E	E	E	E	E	E		E	I	E	NR
Pacomtria	NR	I	I	E	NR	E	NR	NR	E	E	NR	E	E	E	NR		E	E	E	E	E	E		E	I	I/E	I
Extração de Testemunhos	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	I	NR	NR
Aspersão de Nitrato de Prata	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	I	NR	NR
Dureza Superficial - Ensaio Esclerométrico	NR	I	I	E	NR	NR	NR	NR	E	E	E	E	E	E	NR		E	E	E	NR	E	E		E	I	I/E	I
Resistividade Elétrica	I	I	I	NR	NR	I	I	I	I	NR	I	NR	NR	NR	NR		I	I	NR	I	I	I		NR	I	I	I
MEV	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	I	NR	NR
Aplicação do Método GDE UnB	I	I	I	I/E	I	I/E	I	I/E	I/E	I/E	I/E	E	E	E	E	I/E	I/E	I/E	E	I/E	I/E	E	I/E	I/E	I/E		

Legenda	
E = Externo	103
I = Interno	45
I/E = Interno e Externo	70
NR = Não Realizado	184
Total	405

25% das análises foram realizadas avaliando-se a face EXTERNA do elemento estrutural.

11% das análises foram realizadas avaliando-se a face INTERNA do elemento estrutural.

17% das análises foram realizadas avaliando-se a face INTERNA e EXTERNA do elemento estrutural.

45% das análises não foram possíveis de serem avaliadas porque o elemento estrutural estava inacessível.

Continuação Tabela 3.5 - Plano de amostragem para realização dos ensaios no concreto.

Ensaio e Experimentos Diagnósticos no Concreto	Calha Parshall				Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários				Decantador 1 Não possui laje superior	Decantador 2 Não possui laje superior	Decantador 3 Não possui laje superior	Tanque de Efluente Final				Tanque Armazenagem de Lodo							
	L1	P1	P2	P3	NÃO POSSUI LAJE SUPERIOR	P1	P2	P3	P4	P1	P1	P1	NÃO POSSUI LAJE SUPERIOR	P1	P2	P3	P4	L1	P1	P2	P3	P4	
Nome do Elemento Estrutural	E	I/E	I/E	I/E		I/E	I/E	I/E	I/E	I/E	I/E	I/E		I/E	I/E	I/E	I/E	I/E	I/E	E	I/E	I/E	I/E
Análise Visual	NR	E	E	E		E	E	E	E	E	E	E		E	E	E	E	E	E	NR	E	E	E
Carbonatação	E	E	E	E		E	E	E	E	E	E	I/E		E	E	E	E	E	E	NR	E	E	E
Pacometria	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Extração de Testemunhos	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Aspersão de Nitrato de Prata	NR	E	E	E		E	E	E	E	E	E	I/E		E	E	E	E	NR	E	NR	E	E	
Dureza Superficial - Ensaio Esclerométrico	I	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	I		I	I	I	I	NR	NR	NR	NR	NR	
Resistividade Elétrica	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
MEV	NR	I/E	I/E	I/E		I/E	I/E	I/E	I/E	I/E	I/E	I/E		I/E	I/E	I/E	I/E	E	I/E	I/E	I/E	I/E	
Aplicação do Método GDE UnB																							

Legenda	
E = Externo	103
I = Interno	46
I/E = Interno e Externo	69
NR = Não Realizado	187
Total	405

25% das análises foram realizadas avaliando-se a face EXTERNA do elemento estrutural.
 11% das análises foram realizadas avaliando-se a face INTERNA do elemento estrutural.
 17% das análises foram realizadas avaliando-se a face INTERNA e EXTERNA do elemento estrutural.
 46% das análises não foram possíveis de serem avaliadas porque o elemento estrutural estava inacessível.

3.2.2 Métodos e ensaios caracterização dos esgotos

A caracterização dos esgotos foi obtida de maneira documental, visto que a concessionária que opera a estação estudada realiza rotineiramente análises do esgoto afluente e efluente. As amostras do afluente de esgoto são coletadas em um poço de visita antes de chegar na grade grossa e a amostra de efluente são coletadas no Tanque de Efluente Final, dentro da ETE.

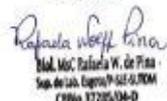
3.2.2.1 Análise físico-química dos esgotos e histórico de vazão da ETE

Com relação às análises de sólidos nos esgotos, o tipo de sólido mais importante para realização deste estudo são os sólidos grosseiros relativos à areia e pedras. As quantidades destes sólidos foram obtidas de maneira documental e avaliada a quantidade (teor) desses sólidos e sua correlação com a erosão superficial em unidades de tratamento, juntamente com a velocidade do efluente líquido.

Há duas informações interessantes para correlação com o Dano “Erosão”: a primeira delas está relacionada com a quantidade de sólidos totais e totais fixos, assim como a quantidade de areia removida no desarenador e a segunda delas diz respeito à granulometria dos sólidos removidos no desarenador. A concessionária possuía em seus arquivos uma análise da curva granulométrica dos resíduos removidos do Desarenador (Caixa de Areia), essa amostra foi caracterizada em Abril de 2013 (SANEAGO, 2013). Foi coletada uma nova amostra no desarenador para uma nova caracterização quanto à granulometria do resíduo (SANEAGO, 2018).

Além disso, de maneira documental também obteve-se o volume de areia removido do desarenador no período de Janeiro de 2016 a Dezembro de 2017 para avaliar a concentração desses sólidos no efluente e também a análise de sólidos totais fixos nesse período amostral, obtidos dos Laudos de Análise Físico-Química e Bacteriológica do esgoto. Salienta-se que a metodologia para realização dessas análises são padronizadas conforme recomendações da “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” da APHA/AWWA (American Public Health Association and American Water Works Association). A Figura 3.21 mostra um exemplo dos laudos da concessionária.

Figura 3.21 – Laudo padrão de Resultados de Análise de Esgotos (SANEAGO, 2016)

SANEAMENTO DE GOIÁS S.A.		RESULTADO DE ANÁLISE DE ESGOTO							
Material: EFLUENTE LÍQUIDO				Nº Protoc.: 204 e 205					
Local: ETE GOIÂNIA				Chuvvas: SIM					
Município: GOIANIA				Temperatura Ambiente: 25,3 a 26,4					
Responsável pela coleta: CLEYVISSON JUNIOR VIDAL DOS SANTOS				Interessado:					
Data de Entrada Laboratório: 18/01/2017				Hora de Entrada no Lab.: 10:47					
ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS									
DADOS DA AMOSTRA	RESULTADOS							UNIDADE	V.M.P.* no efluente final
	AFLUENTE	EFLUENTE FINAL	-	-	-	-	-		
Data da Coleta	17/01/2017	17/01/2017	-	-	-	-	-	-	-
Hora da Coleta	-	09:00 a 21:00	-	-	-	-	-	-	-
Temperatura da Amostra	-	26,8 a 28,1	-	-	-	-	-	°C	40,0
DBO	253,0	180,0	-	-	-	-	-	mg/L O ₂	60,0
DQO	714,0	479,0	-	-	-	-	-	mg/L O ₂	NR
PH	7,29	7,15	-	-	-	-	-	-	5,0 a 9,0
SULFETO	1,12	<0,05	-	-	-	-	-	mg/L S	1,0
SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS	3,0	0,2	-	-	-	-	-	mL/L/h	1,0
SÓLIDOS SUSPENSOS	323,0	153,0	-	-	-	-	-	mg/L	NR
TURBIDEZ	236,0	94,6	-	-	-	-	-	UNT	NR
ÓLEOS E GRAXAS	45,4	31,0	-	-	-	-	-	mg/L	50,0
Notas: 1) Os métodos determinados para os parâmetros de referência seguem as recomendações do "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" da APHA/AWWA e os resultados devem ser interpretados como representando parte da composição da amostra no momento da análise. 2) * Legislação Estadual – Lei nº 8.544 de 17/10/78 (SEMAGO/84) e os demais Resolução CONAMA 357/2005 art. 34 que estabelece os padrões de lançamento de efluentes de qualquer natureza em águas interiores, superficiais ou subterrâneas.									
Data	Responsável pela Análise			Responsável Técnico			Supervisão		
08/02/2017	 Clevisson Junior Vidal dos Santos CRG 22180413 Laboratório de Esgoto SANEAGO			 Rafaela Wolff Lima Eng. Msc. Rafaela W. de Lima Sup. de Lab. Esgoto SANEAGO CRG 37205/04-D					
0245F(06) – FR04.0245.06				24/02/10					

São realizadas muitas análises durante todo o ano com vistas a monitorar o processo de tratamento e o atendimento à legislação, sendo que em 2016 e 2017 foram feitas mais de 140 análises do esgoto, excluindo-se análises específicas do lodo ou outros resíduos. Destas, foram selecionadas as análises que contivessem resultados de constituintes com influência na deterioração do concreto pois nem todas as características são analisadas em todas as amostras coletadas. Após este filtro, restaram 67 laudos de 2016 e 68 em 2017.

Foram retirados dos laudos, os resultados de DBO, DQO, temperatura e pH para observar o comportamento desses parâmetros do efluente e afluente a permitir uma caracterização da estação.

Além desses parâmetros, foram avaliados ainda os sulfetos detectados no efluente e afluente e também nitrogênio amoniacal e assim verificar a possibilidade de agressividade ao concreto. A frequência de análise do teor de sulfetos era, em média, de duas análises ao mês e foram realizadas 22 análises durante o ano de 2016 e a mesma quantidade em 2017. Com relação ao

Nitrogênio Amoniacal, foram realizadas 5 análises em 2016 e 4 análises em 2017.

A vazão afluyente à ETE também foi obtida de maneira documental referente ao período de 2016 a 2017 para uma melhor caracterização da ETE.

3.2.2.2 Tempo de detenção hidráulica (TDH) e variação do nível de esgoto dentro de unidades de tratamento

O Tempo de Detenção de Hidráulica (TDH) é o tempo em que o esgoto permanece em determinada unidade de tratamento. Este tempo é parâmetro importante para avaliação da deterioração do concreto por estar relacionado à atividade anaeróbia e, conseqüentemente, à produção de sulfetos. Assim, quanto mais tempo o esgoto permanece em uma unidade a profundidades consideráveis e sem ingresso de oxigênio no fluido, maior é a quantidade de sulfetos que se desprende do esgoto e alcança a atmosfera proporcionando ataque ácido ao concreto.

Assim, os tempos de detenção hidráulica previstos em projeto, do poço de sucção, do desarenador, decantador e do tanque de armazenagem do lodo foram avaliados de forma indireta para verificar sua relação com a degradação das unidades.

O tempo de detenção hidráulica é muito importante quando há grandes profundidades nas unidades de tratamento pois a profundidade impede o oxigênio de chegar até as camadas mais profundas, o que favorece a formação de sulfetos.

De forma documental, foi obtido também o histórico diário de operação das bombas que mostram o funcionamento das mesmas e a variação do nível do poço de sucção referente ao período de 2016 a 2017.

3.2.2.3 Velocidade do efluente nas unidades de tratamento preliminar

A velocidade do efluente foi mensurada no canal que conduz o efluente para o desarenador, na unidade de desarenação da ETE, no desarenador e no canal que conduz o esgoto para a Calha Parshall. Essa aferição foi importante para correlacionar a erosão sofrida na unidade com a quantidade de areia verificada no item 3.2.2.1, pois conforme verificado na literatura esse é um dos fatores que proporcionam a erosão do concreto. A velocidade foi medida por meio de sonda eletromagnética modelo OTT MF Pro, Figura 3.22. Essa sonda possui

capacidade para medir velocidades entre 0 e 6 m/s. Essa velocidade foi mensurada na altura média da unidade que conduz o esgoto ao desarenador e também no vertedouro do desarenador e no canal que conduz à Calha Parshall, sendo que, neste último, a aferição da velocidade foi realizada na camada mais superficial devido às condições de acesso e posicionamento do equipamento.

Figura 3.22 – Sonda Eletromagnética para a medição de velocidade instantânea



3.2.2.4 Métodos analíticos de mensuração de H₂S na atmosfera

Grasel (2004) realizou a mensuração de sulfeto de hidrogênio (gás sulfídrico) nas proximidades de duas ETEs por meio de amostradores passivos. Essa amostragem utiliza cartuchos que adsorvem quimicamente o sulfeto por acetato de zinco, gerando sulfeto de zinco que é analisado posteriormente por espectrofotometria. A amostra fica exposta ao ambiente por uma semana.

Para quantificar o sulfeto de hidrogênio, foi acrescentada 10 mL de água e agitado durante 5 minutos e posteriormente foi adicionado 0,5 mL de cloreto férrico de amina dentro do antigo tubo que armazenava o cartucho. Desta forma, o sulfeto foi extraído do cartucho e o tubo imediatamente fechado para que não houvesse perda do gás. Então, houve novamente 5 minutos de agitação. Quando o sulfeto reage com o cloreto férrico numa solução ácida, reage com o íon N,N-dimetil-p-fenileno diamônio e produz azul de metileno (C₁₆H₁₈N₃SCl).

Após 30 minutos, tempo de conclusão da reação, a absorvância do composto formado por cada amostra foi medida por espectrofotometria visível. Antes de calcular a concentração do gás sulfeto, foram corrigidos os efeitos da temperatura e umidade na taxa de amostragem,

conforme indicado por Grasel (2004).

A concessionária que opera a ETE H está com uma pesquisa em andamento para avaliar a quantidade de sulfetos na atmosfera da estação e os impactos sociais que o gás provoca na população vizinha. A amostragem dessa outra pesquisa engloba diversos pontos dentro e fora da estação. Em parceria com esta outra pesquisa, optou-se por incluir os resultados dela nesta dissertação com uma abordagem voltada para a agressividade ambiental ao concreto, utilizando somente os resultados amostrais nas unidades de tratamento da ETE e ainda duas campanhas extras realizadas, visando verificar o teor de sulfetos no interior do ambiente confinado da grade grossa, do poço de sucção e do tanque de transição, pois a proposta da pesquisa da concessionária, não incluía o ambiente interno das unidades de tratamento. Todos os resultados aqui apresentados são de propriedade da concessionária (SANEAGO, 2018).

A Figura 3.23 apresenta os pontos de amostragem instalados pela concessionária (SANEAGO, 2018), sendo que os pontos GG, PS e TT se referem a medições no ambiente interno a pedido desta pesquisa e por este motivo possuem somente 2 campanhas amostrais. As campanhas foram realizadas por uma semana nos meses de Abril, Junho, Julho, Agosto, Setembro, Outubro, Novembro, Dezembro de 2017 e Fevereiro de 2018 e duas semanas de fevereiro no ambiente interno da GG, PS, TT.

Figura 3.23 – Pontos de Amostragem para Avaliação do Sulfato de Hidrogênio



Buscou-se instalar os amostradores em locais protegidos de respingos. No entanto, nas unidades GG e PS a primeira campanha acabou se molhando o que fez com que o teor de sulfetos fosse mais diluído. Mesmo com essa dissolução, os resultados foram maiores que o restante das campanhas no ambiente externo. Desta forma, optou-se por não descartar a primeira campanha da GG e PS e foi realizada mais uma campanha e nesta conseguiu-se garantir que o amostrador não recebesse nenhum tipo de respingo.

A Tabela 3.6 apresenta as legendas para os ícones. Houve a tentativa de manter a mesma nomenclatura elencada na Tabela 3.3, entretanto, foram estudados mais pontos para melhor caracterização ambiental do teor de sulfetos na atmosfera da ETE.

Tabela 3.6 – Legendas dos pontos de amostragem de Sulfeto de Hidrogênio

Sigla	Ponto de Amostragem	Coordenadas Geográficas	Sigla	Ponto de Amostragem	Coordenadas Geográficas
GG	Interior da Grade Grossa	16°37'56.80"S 49°15'42.77"O	TL	Tanque de Armazenagem de Lodo	16°37'46.25"S 49°15'40.37"O
PS	Interior do Canal que vai para o Poço de Sucção	16°37'56.73"S 49°15'42.67"O	CH	Chorume – Ambiente Chegada de Esgoto Bruto	16°37'56.04"S 49°15'43.68"O
TT	Interior do Tanque de Transição	16°37'55.86"S 49°15'42.10"O	LP	Ponto de descarga dos Limpa Fossa	16°37'57.26"S 49°15'43.16"O
GF	Canal de Chegada/Grade Fina	16°37'52.04"S 49°15'37.72"O	TF	Elevatória de Lodo/Tanque de Efluente Final	16°37'48.29"S 49°15'40.94"O
D1	Decantador Primário 1	16°37'49.28"S 49°15'37.13"O			

3.3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO GRAU DE DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO (GDE/UnB adaptado)

Conforme já explanado no Capítulo 2, a metodologia GDE/UnB segue a sequência exposta na Figura 2.13 e a utilização das Equações 2.3 a 2.7. Porém para que a metodologia fosse aplicada em ETEs foram necessárias adequações nas Famílias de Elementos, Fatores de Ponderação, Fatores de Intensidade e Fatores de Relevância.

As famílias de elementos em estruturas de ETEs apresentam-se essencialmente em paredes de concreto e lajes, visto que na análise dos elementos estruturais, não é possível distinguir visualmente pilares e vigas. Assim, para efeito da avaliação neste tipo de estrutura, a divisão da família de elementos foi somente entre Lajes e Paredes.

A proposta de Fonseca (2007) tratava de cortinas como sendo os muros de arrimos em edificações. Desta forma, dada a similaridade das solicitações que as paredes laterais dos canais e tanques sofrem, os danos adotados foram similares aos considerados para as cortinas por Fonseca (2007).

Devido às dificuldades de paralisações do SES e ainda as consequências que estas paralisações podem trazer ao meio ambiente por extravasamentos, toda a avaliação ocorreu com o sistema em funcionamento. Portanto, não foi possível visualizar as lajes de fundo dos

canais e tanques, exceto se as mesmas já estavam paralisadas, como foi o caso do Desarenador 3 e Decantador 3. As lajes analisadas foram as lajes superiores das unidades que as possuíam, pois a maior parte do sistema trata-se de condutos livres e abertos.

Os fatores de ponderação evidenciam a importância ou consequência que determinada manifestação patológica representa para a família de elementos. Assim, a Tabela 3.7 foi adaptada da tabela proposta por Fonseca e expõe os fatores de ponderação utilizados na aplicação da metodologia em ETEs, em negrito estão destacados os fatores alterados.

Tabela 3.7 – Fatores de Ponderação para avaliação dos elementos adotados por Fonseca (2007) e propostos para avaliação de ETEs

Manifestação Patológica	Laje		Parede	
	FONSECA (2007)	Fator de Ponderação Proposto	FONSECA (2007)	Fator de Ponderação Proposto
Carbonatação	3	3	3	3
Cobrimento Deficiente	3	3	3	3
Contaminação por Cloretos	3	3	4	4
Corrosão das Armaduras	5	5	5	5
Desagregação	3	3	3	3
Deslocamento por Empuxo	-	-	5	5
Desvios de Geometria	-	-	3	3
Eflorescências	2	2	2	2
Falhas de Concretagem	2	2	2	2
Fissuras	2 a 5	5	2 a 5	5
Desplacamento	3	3	3	3
Manchas	3	3	3	3
Sinais de Esmagamento	-	-	5	5
Umidade	3	3	3	3
Flechas	5	5	-	-
Erosão*	-	-	-	4

OBS: * Essa manifestação está sendo acrescentada na metodologia GDE/UnB, visto que se trata de manifestação típica de sistemas de esgotamento sanitário, sendo estas as únicas alterações feitas no fator de ponderação da metodologia.

As modificações nos Fatores de Intensidade se resumiram unicamente ao incremento da manifestação patológica Erosão dentro do escopo da avaliação metodológica. Assim, a Tabela 3.9 foi mantida e somente foram acrescentadas as informações referentes à manifestação supracitada. Houve também alterações na descrição dos fatores de ponderação dos danos “Carbonatação” e “Cobrimento”. A Tabela 3.8 expõe a versão final aplicada na avaliação de estações de tratamento de esgotos.

Tabela 3.8 – Fator de Intensidade do dano x Tipo de Manifestações adotados na presente pesquisa

Tipos de Danos	Fator de Intensidade do dano - Tipos de manifestação
Carbonatação	1-espessura carbonatada representa 33,3% do cobrimento; 2- espessura carbonatada representa entre 33,3% e 66,6% do cobrimento; 3- espessura carbonatada representa entre 66,6% e 99,9% do cobrimento; 4- espessura carbonatada representa mais que 100% do cobrimento;
Cobrimento Deficiente	1- cobrimento entre 3 e 4 cm - (de acordo com o preconizado em projeto e a norma em vigência na época de sua elaboração) 2-cobrimento entre 2 e 3 cm - (de acordo com o preconizado em projeto e a norma em vigência na época de sua elaboração) 3-cobrimento entre 1 e 2 cm - (de acordo com o preconizado em projeto e a norma em vigência na época de sua elaboração) 4-cobrimento entre 0 e 1 cm - (de acordo com o preconizado em projeto e a norma em vigência na época de sua elaboração)
Contaminação por Cloretos	2-em elementos no interior sem umidade; 3-em elementos no exterior sem umidade; 4-em ambientes úmidos.
Corrosão de Armaduras	2-manifestações leves, pequenas manchas; 3-grandes manchas e/ou fissuras de corrosão; 4-corrosão acentuada na armadura principal, com perda relevante de seção.
Desagregação	2-início de manifestação; 3-manifestações leves, início de estofamento do concreto; 4-por perda acentuada de seção e esfarelamento do concreto.
Deslocamento por Empuxo	3-deslocamento lateral da parede no sentido horizontal, estável; 4- deslocamento lateral da parede no sentido horizontal, instável.
Desplacamento	2 – pequenas escamações do concreto; 3 – lascamento de grandes proporções, com exposição da armadura 4 – lascamento acentuado com perda relevante de seção
Desvios de Geometria	2-pilares e paredes com excentricidade $\leq h/100$ (h=altura); 3- pilares e paredes com excentricidade $h/100 \leq e < h/50$; 4-pilares e paredes com excentricidade $\geq h/50$.
Eflorescência	1-início de manifestações; 2-manchas de pequenas dimensões; 3-manchas acentuadas, em grandes extensões; 4-grandes formações de crostas de carbonato de cálcio (estalactites).
Falha de Concretagem	1-superficial e pouco significativa em relação às dimensões da peça; 2-significativa em relação às dimensões da peça; 3-profunda em relação às dimensões da peça, com ampla exposição da armadura; 4-perda relevante da seção da peça.
Fissuras	1-abertura menores do que as máximas previstas em norma; 2-estabilizadas, com abertura até 40% acima dos limites de norma; 3-abertura excessivas; estabilizadas; 4-aberturas excessivas; não estabilizadas.
Flechas	1-não perceptíveis a olho nu; 2-perceptíveis a olho nu, dentro dos limites previstos em norma; 3-superiores em até 40% às previstas na norma; 4-excessivas.
Impermeabilização Deficiente	2-danos na camada protetora e/ou perda de elasticidade do material da impermeabilização; 3-descontinuada, degradada em alguns pontos (pontos de infiltração); 4-degradação acentuada, com perda relevante da estanqueidade.
Manchas	2-manchas escuras de pouca extensão, porém significativas (<50% da área visível do elemento estrutural); 3-manchas escuras de grande extensão (>50%); 4-manchas escuras em todo elemento estrutural (100%).
Obstrução das Juntas de Dilatação	2-perdas de elasticidade do material da junta; início de fissuras paralelas às juntas nas lajes adjacentes; 3-presença de material não compressível na junta; grande incidência de fissuras paralelas às juntas nas lajes adjacentes; 4-fissuras em lajes adjacentes às juntas, com prolongamento em vigas e/ou pilares de suporte.

Continuação Tabela 3.8 – Fator de Intensidade do dano x Tipo de Manifestações adotados na presente pesquisa

Tipos de Danos	Fator de Intensidade do dano - Tipos de manifestação
Recalques	2-indícios de recalque pelas características das trincas na alvenaria; 3-recalque estabilizado com fissuras em peças estruturais; 4-recalque não estabilizado com fissuras em peças estruturais.
Sinais de Esmagamento do Concreto	3-desintegração do concreto na extremidade superior do pilar, causada por sobrecarga ou movimentação da estrutura; fissuras diagonais isoladas; 4-fissuras de cisalhamento bidiagonais, com intenso lascamento e/ou esmagamento do concreto devido ao cisalhamento e a compressão, com perda substancial de material; deformação residual aparente; exposição e início de flambagem de barras da armadura.
Umidade	1-indícios de umidade; 2-pequenas manchas 3-grandes manchas; 4-generalizada.
Umidade na base	3-indícios de vazamento em tubulações enterradas que podem comprometer as fundações; 4-vazamentos em tubulações enterradas causando erosão aparente junto às fundações
Erosão*	1-leve perda do material de superfície com aspecto de polimento no agregado graúdo; 2-perda superficial considerável, com exposição de uma espessura considerável do agregado graúdo; 3-profunda com perda de agregado graúdo; 4-profunda e com exposição da armadura.

OBS: *Essa manifestação está sendo acrescentada na metodologia GDE/UnB, visto que se trata de manifestação típica de sistemas de esgotamento sanitário. Em negrito estão destacadas as únicas alterações feitas no fator de intensidade da metodologia proposta por Fonseca (2007).

Com relação aos fatores de relevância, considerou-se fator de relevância 3 para lajes e 5 para paredes, a Tabela 3.10 mostra as adaptações realizadas, em negrito estão os novos valores a serem adotados. Essa alteração se justifica pelo fato de que o colapso de uma parede inutiliza a unidade de tratamento e promove o derramamento de esgoto no meio ambiente. Já o colapso de uma Laje, caso venha a ocorrer sem causar grandes danos à Parede da unidade, pode ser removida e a unidade de tratamento ser mantida em operação.

Tabela 3.9 – Fator de Relevância adotados por Fonseca (2007) e propostos para avaliação de ETes conforme família de elementos

Família de Elementos	Fator de Relevância Estrutural proposto por Fonseca (2007)	Fator de Relevância Estrutural proposto para ETes
Lajes	4	3
Paredes	3	5

Para cada elemento estrutural foram utilizadas as fichas modelo apresentadas na Tabela 3.10, para lajes, e na Tabela 3.11, para paredes como ferramenta para avaliação investigativa das unidades. Essas tabelas foram elaboradas com base nos parâmetros apresentados anteriormente para aplicação da metodologia GDE/UnB.

Tabela 3.10 – Ficha Modelo para Avaliação da Deterioração de Lajes de Concreto de ETES

Nome do Elemento	XXL1	D _{máx}	0		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3		0		
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	3		0		
Corrosão das Armaduras	5		0		
Desagregação	3		0		
Deslocamento por Empuxo	-		0		
Desvios de Geometria	-		0		
Eflorescências	2		0		
Falhas de Concretagem	2		0		Foto do Elemento Estrutural
Fissuras	5		0		
Desplacamento	3		0		
Manchas	3		0		
Sinais de Esmagamento	-		0		
Umidade	3		0		
Flechas	5		0		
Erosão	-		0		
Grau de deterioração de um elemento L1					

Tabela 3.11 – Ficha Modelo para Avaliação da Deterioração de Paredes de Concreto de ETES

Nome do Elemento	XXP1	D _{máx}	0		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3		0		
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	4		0		
Corrosão das Armaduras	5		0		
Desagregação	3		0		
Deslocamento por Empuxo	5		0		
Desvios de Geometria	3		0		
Eflorescências	2		0		
Falhas de Concretagem	2		0		Foto do Elemento Estrutural
Fissuras	5		0		
Desplacamento	3		0		
Manchas	3		0		
Sinais de Esmagamento	5		0		
Umidade	3		0		
Flechas	-		0		
Erosão	4		0		
Grau de deterioração do elemento P1					

Para a determinação do Grau de Deterioração da ETE considerou-se toaos as paredes e lajes de todas as unidade de tratamento da estação e calculou-se como se fosse somente uma estrutura, aplicando-se as Equações 2.3 a 2.7.

3.3.1 Análise da Classificação do Grau de Deterioração e da Influência da Quantidade de Elementos no G_{df}

Foi realizada uma análise gráfica sobre o Método GDE/UnB para verificar o comportamento da classificação do Grau de Deterioração das Estruturas em função da variação dos Fatores de Intensidade aplicados nos elementos estruturais. Essa análise foi realizada de modo a permitir a visualização gráfica das faixas de classificação do método e, assim, redefini-las de modo a torná-la mais próxima da realidade verificada *in loco*.

Verificou-se a necessidade desta análise devido às discussões quanto a proposição de alterações na metodologia, principalmente no que refere à faixa e forma de variação do F_i (de 0 a 4). O método adotado para esta análise foi a simulação por meio de planilha de excel considerando que todas as manifestações patológicas que originam o dano se encontram num mesmo instante com Fator de Intensidade 1, depois com Fator de Intensidade 2, posteriormente com Fator de Intensidade 3 e, por fim, com Fator de Intensidade 4; e, então, foram adotadas as equações já consolidadas por Fonseca (2007) e gerados os gráficos. A Tabela 3.12 é um exemplo de como essa análise foi realizada.

Tabela 3.12 – Análise dos danos para os fatores de intensidade simulados

Nome do Elemento	XXP1	D _{máx}	4	D _{máx}	8	D _{máx}	40	D _{máx}	100
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Fator de Intensidade	Dano	Fator de Intensidade	Dano	Fator de Intensidade	Dano
Carbonatação	4	1	3,2	2	6,4	3	32	4	80
Cobrimento Deficiente	4	1	3,2	2	6,4	3	32	4	80
Contaminação por Cloretos	4	1	3,2	2	6,4	3	32	4	80
Corrosão das Armaduras	5	1	4	2	8	3	40	4	100
Desagregação	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Deslocamento por Empuxo	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Desvios de Geometria	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Eflorescências	2	1	1,6	2	3,2	3	16	4	40
Falhas de Concretagem	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Fissuras	5	1	4	2	8	3	40	4	100
Desplacamento	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Manchas	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Sinais de Esmagamento	5	1	4	2	8	3	40	4	100
Umidade	3	1	2,4	2	4,8	3	24	4	60
Flechas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Erosão	4	1	3,2	2	4,4	3	32	4	80

As análises realizadas encontram-se no Apêndice A e foram importantes para elaboração da Considerou-se também a variação da quantidade de elementos estruturais que determinada unidade de tratamento possui, pois, de acordo com as fórmulas matemáticas previstas no método, isso influencia no Grau de Deterioração das Famílias de Elementos e, conseqüentemente, no Grau de Deterioração da Estrutura como um todo. Variou-se a quantidade de elementos estruturais existentes até que se percebe que o grau de deterioração final não mais era influenciado pela quantidade de elementos existentes.

No caso das ETEs, que em geral uma unidade possui uma única laje e quatro paredes, essa quantidade menor de elementos estruturais ocasiona um Grau de Deterioração de Famílias de elementos estruturais um pouco menor do que se houvesse mais paredes e laje. Verificou-se que estes GD_f aumenta até que seja estabilizado com 30 elementos estruturais.

proposta que se apresenta na Tabela 3.13 para classificação do grau de deterioração.

Tabela 3.13 - Alteração das Faixas de Classificação do Método GDE/UnB

Nível de Deterioração	G_{de}/G_d (FONSECA, 2007)	Ações a serem adotadas (FONSECA, 2007)	G_{de}/G_d propostos neste trabalho	Ações a serem adotadas propostas neste trabalho
Baixo	0-15	Estado Aceitável. Manutenção Preventiva	0-15	Estado Aceitável. Manutenção Preventiva
Médio	15-50	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (Max. 2 anos)	15-70	Definir prazo/natureza para nova inspeção. Planejar intervenção em longo prazo (Max. 2 anos)
Alto	50-80	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (Max. 1 ano)	70-190	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (Max. 1 ano)
Sofrível	80-100	Definir prazo/natureza para inspeção especializada detalhada. Planejar intervenção em curto prazo (Max. 6 meses)	Eliminado	Eliminado
Crítico	>100	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata	>190	Inspeção especial emergencial. Planejar intervenção imediata

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo expõe e discute os resultados dos métodos de ensaio executados nos elementos estruturais da ETE e sua relação com a aplicação da metodologia GDE/UnB.

4.1 RESULTADOS PARCIAIS OBTIDOS POR PILOTOS

A Tabela 4.1 explana os resultados parciais obtidos no levantamento inicial realizado por Dias, Carasek e Cascudo (2016) especificamente na ETE adotada neste estudo.

Tabela 4.1 – Resultados das manifestações patológicas observadas e o grau de deterioração, considerando a ETE e a unidade de tratamento em levantamento inicial realizado por Dias, Carasek e Cascudo (2016)

ETE	Idade (Anos)	Unidade de Tratamento	Erosão	Corrosão Armaduras	Corrosão Concreto	Biodeterioração
ETE H	12	Poço de Sucção	0	3	1	3
		Canal da Grade Fina	1	0	3	3
		Caixa de Areia	0	0	0	3
		Calha Parshall	0	0	0	3
		Decantadores Primários	1	3	1	2
		Tanque Armazenagem de Lodo	0	3	3	3

Intensidade: 0 - inexistente; 1 - pouca intensidade; 2 - intensidade média; 3 - grande intensidade. O canal da primeira grade da ETE H não foi inspecionado.

Os tipos de unidade de tratamento sofreram manifestações patológicas mais características como erosão no tratamento preliminar, corrosão das armaduras nos poços de sucção e desagregação do concreto nos tanques de contato.

A desagregação do concreto foi a manifestação patológica mais intensa e apareceu em todas as unidades e tipos de tratamento, devido ao fato da ETE proporcionar um microclima favorável ao desenvolvimento de microorganismos.

O tipo de tratamento de esgoto pode influenciar na intensidade das manifestações patológicas no concreto, porém é necessário considerar vários outros fatores que também podem contribuir para a deterioração das estruturas, tais como a vazão, a idade da ETE, características do esgoto e do concreto.

Concretos com f_{ck} e cobrimentos mais elevados apresentaram menor incidência de deterioração, desta verificação, depreende-se que esses e outros parâmetros prescritivos do concreto e da estrutura voltados à durabilidade devem ser criteriosamente especificados, ao nível do projeto, assim como colocados em prática na especificação e dosagem do concreto, e na execução da estrutura. Além disso, avanços em termos de uma abordagem baseada no desempenho devem ocorrer para que, de fato, possa ser garantida a vida útil dessas estruturas em face da agressividade típica dos ambientes de ETEs.

No segundo trabalho publicado, foi avaliada a ETE H somente com a realização do ensaio de carbonatação e aplicação da metodologia GDE/UnB. Este trabalho serviu como base para avaliação prévia da estação e verificação sobre as dificuldades de aplicação da metodologia (DIAS; CARASEK; CASCUDO, 2017). Posteriormente, a metodologia foi reaplicada com maior subsídio por ensaios complementares e maior experiência por parte da avaliadora.

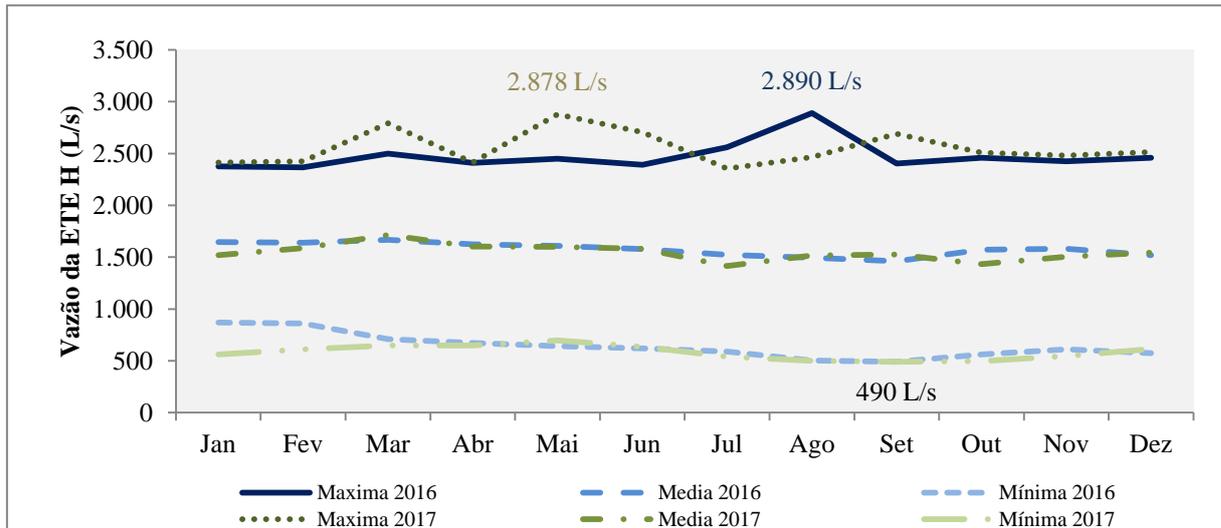
Verificou-se que as faces internas dos elementos estruturais podem apresentar maior deterioração que as faces externas, pois a agressividade do ambiente internamente às unidades é maior devido à presença de umidade e gases provenientes do esgoto, tornando o ambiente propício ao desenvolvimento de manifestações patológicas. Os resultados do grau de deterioração apresentados por Dias, Carasek e Cascudo (2017) são apresentados em comparação com os resultados da segunda aplicação da metodologia (Figura 4.97) e que são os resultados principais desta dissertação.

4.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ETE

Conforme revisão bibliográfica, existe a influência de algumas características físico-químicas do esgoto com potencial agressividade ao concreto. Desta forma, inicia-se a apresentação dos resultados com a Figura 4.1 que mostra o comportamento da vazão afluente à estação durante os anos de 2016 e 2017. O gráfico exposto na Figura 4.1 foi gerado por meio dos dados horários diários de todos os meses dos anos de 2016 e 2017 e desta forma foram selecionadas as vazões mínimas, máximas e médias de cada mês do ano para possibilitar avaliação da variabilidade e as possíveis influências que a vazão pode apresentar com relação à degradação do concreto. Observa-se nesta Figura 4.1 que a vazão da estação varia consideravelmente durante os meses do ano em que a vazão mínima atingida em 2016 e 2017 foi a mesma com o valor de 490 L/s no mês de setembro. Da mesma forma, a vazão máxima afluente na ETE apresentou nos meses de agosto de 2016 e maio de 2017 os respectivos valores de 2890 L/s e

2878 L/s o que proporciona uma variação de quase 600% no decorrer do ano, sendo que a média nos dois anos se manteve praticamente constante no patamar de 1.550 L/s. As unidades implantadas possuem capacidade de tratar 2.290 L/s e, como tratam em média 1.550 L/s, estão operando dentro de sua capacidade.

Figura 4.1 – Vazão da ETE H em 2016 e 2017



A vazão da estação pode influenciar de forma indireta na deterioração do concreto de duas maneiras, são elas:

- Quanto maior o volume de esgoto que adentra à estação, maior é a quantidade de potenciais agentes agressivos ao concreto diluídos no esgoto e, conseqüentemente, maior será a probabilidade de degradação do concreto da estação, como é o caso, por exemplo, das areias;
- Com a variação da vazão, as unidades de tratamento também apresentam variação nos níveis de esgoto dentro de seus tanques proporcionando ciclos de molhagem e secagem em determinadas regiões de suas paredes o que, conseqüentemente, oportuniza uma deterioração mais rápida das regiões expostas a essa variação.

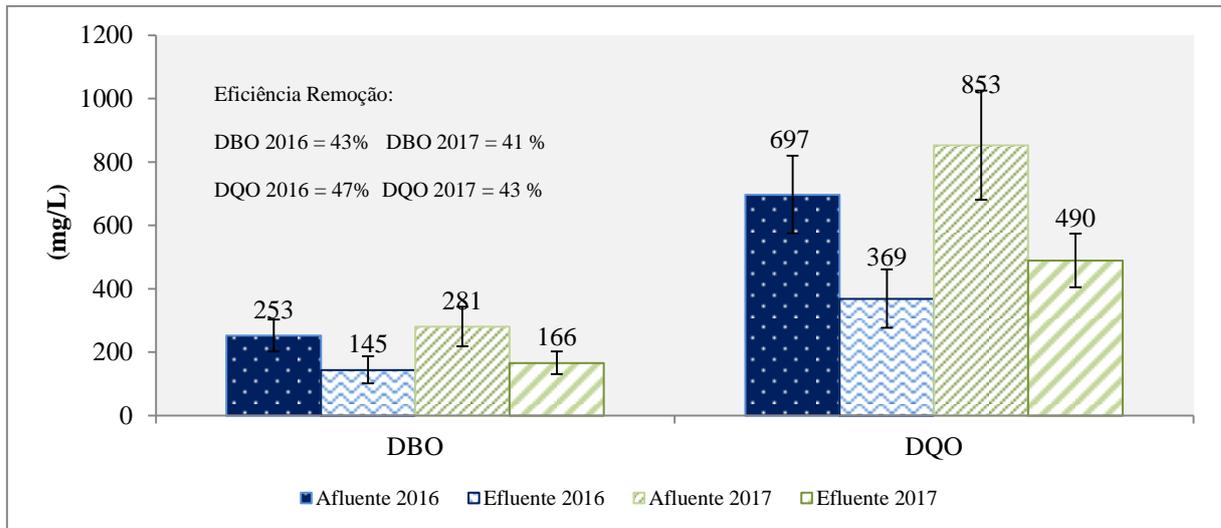
Os locais com variação do nível do efluente em contato com o concreto são regiões com grandes danos em detrimento das regiões que permanecem o tempo todo inundadas, pois a lâmina do fluido dificulta o ingresso dos gases aos poros do concreto, o que acaba inibindo seu potencial agressivo, ou com relação a regiões expostas totalmente à fase gasosa, embora estas também apresentem grandes deteriorações. Kim e Lee (2009) constataram em seus estudos que a resistência à compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e secagem

de esgoto reduziu 50% em comparação com uma amostra localizada em região totalmente emersa (abaixo do nível do esgoto) e exposta às condições atmosféricas. Amostras parcialmente submersas estudadas por Bond *et al.* (2014) apresentaram níveis de desagregação do concreto bem mais elevados do que as amostras expostas somente à ação da fase gasosa, com perdas de 3 a 15 mm após 45 meses de exposição, enquanto as amostras expostas somente à ação de gases perderam entre 1 e 8 mm. Mori *et al.* (1992) também relatam que a região próxima à variação do nível do esgoto foi mais severamente desagregada e que a crista também sofreu desagregação intensa. Os autores expõem ainda que grandes taxas de desagregação ao redor do nível do esgoto são devidas à disponibilidade de nutrientes para as bactérias acidófilas provenientes do esgoto e, após a deterioração, os produtos desta transformação são carregados, acelerando ainda mais o processo de degradação.

Houve um aumento da DBO_{afluente} de 11% e da DQO_{afluente} de 22% em 2017, comparado com 2016, conforme apresentado na Figura 4.2. A eficiência de remoção de DBO da estação reduziu 2% e a de DQO em 4% entre 2016 e 2017 e os parâmetros de DBO_{afluente} estão dentro dos previstos em projeto (310 mg/L). Como a estação é do tipo primário quimicamente assistido, a concessionária realizou ajustes na aplicação do produto químico na fase de coagulação para alcançar a eficiência de projeto de 50%.

A DBO e a DQO não estão diretamente relacionadas à deterioração do concreto. Entretanto, considerou-se importante a apresentação desses resultados para que o efluente fosse melhor caracterizado pois estes são os norteadores do processo de tratamento. A DQO , parâmetro responsável por avaliar a oxidação da matéria orgânica quimicamente, relaciona-se indiretamente à produção de sulfetos, pois quando a relação $DQO/Sulfato$ ultrapassa 10, ocasiona uma maior liberação de gás sulfídrico para o ambiente (CHERNICHARO, 2007). O monitoramento da relação $DQO/Sulfato$ é importante principalmente em sistema de tratamento por princípios anaeróbios devido à maior produção de gases odorantes, assim é importante adotar meios de controle para a emissão de gases para atmosfera.

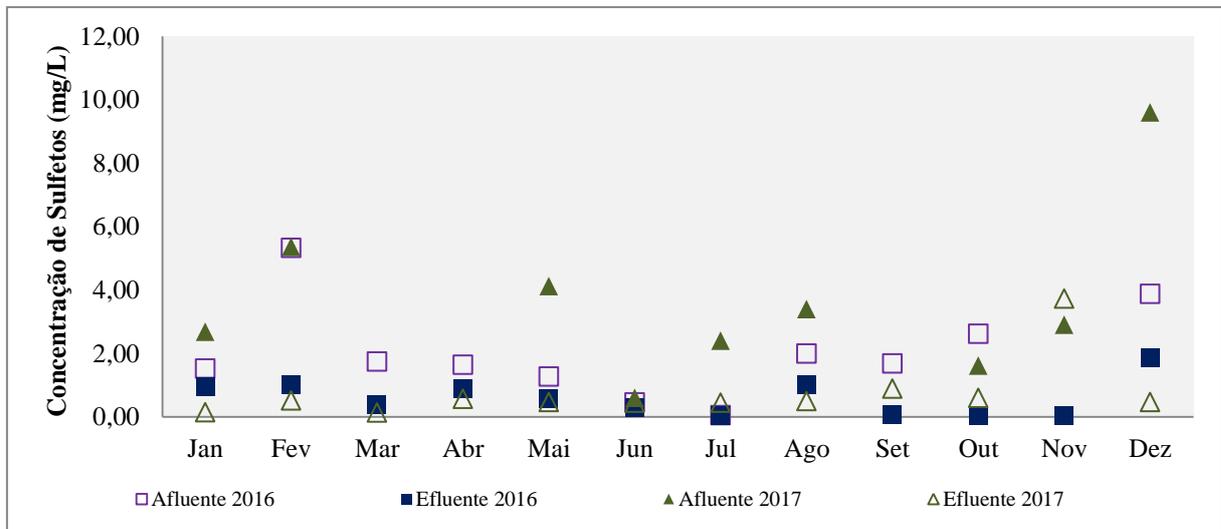
Figura 4.2 – DBO e DQO do efluente da ETE H



Uma outra vertente sobre a influência indireta da DBO na degradação do concreto se apresenta em plantas de tratamento por princípio aeróbio operando saturadas, ou seja, com DBO de entrada superior à capacidade remoção. Essa sobrecarga pode contribuir com o aumento dos gases na atmosfera, pois um aumento da demanda de oxigênio sem a disponibilidade suficiente do mesmo para respiração das bactérias faz com que aumente a necessidade de oxidação de produtos à base de sulfato e conseqüente aumento da produção de gases nocivos ao concreto. Portanto, ETEs com sobrecarga apresentam uma maior acidez ambiental e, conseqüentemente, maior propensão à deterioração do concreto.

A concessionária não monitora a taxa de sulfatos no afluente e no efluente, desta forma somente os resultados da concentração de sulfetos foram disponibilizados para esta pesquisa. A liberação de sulfetos para a atmosfera ocasiona a geração do odor típico dos SES e é o grande responsável pela degradação das estruturas de concreto, seja por ocasionar a desagregação do concreto ou proporcionar um ambiente ácido que provoca a corrosão das armaduras. A Figura 4.3 ilustra o comportamento dos sulfetos no decorrer dos meses dos anos de 2016 e 2017 na estação, com base nos dados disponibilizados pela concessionária. Observa-se que as faixas de sulfetos dissolvidos no esgoto variaram entre 0,05 e 5,33 mg/L no afluente e 0,05 e 1,85 mg/L no efluente de 2016. Já em 2017, a variação ficou entre 0,6 e 9,6 mg/L no afluente e 0,13 e 3,73 mg/L no efluente.

Figura 4.3 – Sulfetos no esgoto doméstico tratado na ETE H



Com a liberação de sulfetos no esgoto, estes reagem com hidrogênio disponível no meio formando H_2S (sulfeto de hidrogênio) dissolvido nos esgotos e em condições de turbulência, aumento da temperatura ou redução do pH, principalmente abaixo de 7 (BOWKER *et al.*, 1989¹³ *apud* LEITE *et al.* 2000; ANTUNES, 2006), esse gás é liberado para a atmosfera.

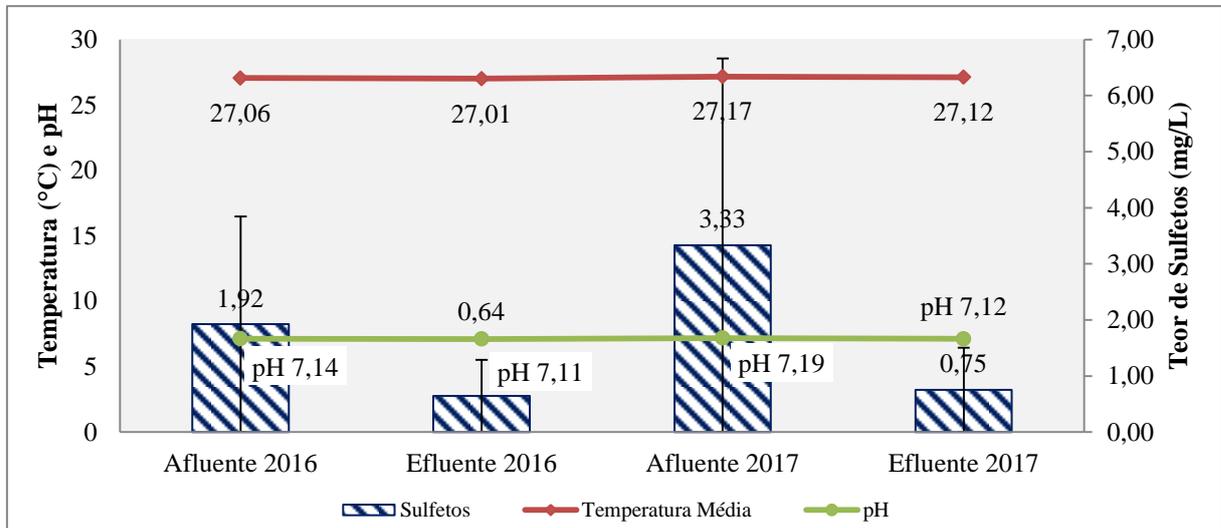
Na Figura 4.4 é possível verificar que nem a temperatura e nem o pH apresentam grandes variações nos dois períodos analisados mantendo-se nos patamares, respectivamente, de 27 °C e pH de 7,1. Entretanto, há uma ligeira queda entre o esgoto bruto (afluente) e o esgoto tratado (efluente) para a temperatura e o pH e uma diferença mais brusca entre o teor de sulfetos afluente e efluente. Assim, depreende-se que a influência significativa da temperatura e pH na produção de sulfetos existe para variações com maior amplitude permitindo verificar que na ocorrência de pequenas variações destas características físicas do esgoto, há outros fatores com interferência mais representativa, como, por exemplo, a quantidade de sulfatos e oxigênio disponível, turbulência do fluido, entre outros.

Pode-se perceber ainda que houve um aumento no teor de sulfetos afluente entre 2016 e 2017. Esse aumento pode ser em decorrência de um aumento da contribuição de produtos à base de sulfatos na rede ou aumento do tempo de detenção no sistema de coleta e transporte e a concessionária não possuía este dado. Esse aumento pode ainda ocasionar a liberação de sulfeto para atmosfera da ETE, uma vez que o teor de sulfeto no efluente final é bem próximo comparando-se 2016 e 2017. Desta forma, o ambiente da estação pode ter se tornado um

¹³BOWKER, R. P. G., SMITH, J. M.; WEBSTER, N. A. Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants. Hemisphere Publishing Corporation. 132p. 1989.

pouco mais ácido para o concreto.

Figura 4.4 – Teor de Sulfeto, Temperatura e pH nos esgotos



*As colunas representam o teor de sulfetos no afluente e efluente líquidos

Obteve-se também o resultado do teor de sulfetos na atmosfera da ETE H que segue apresentado na Figura 4.5, em que está correlacionado o teor de sulfetos com cada uma das unidades de tratamento.

As unidades PS, GG e TT apresentam resultados referentes ao teor de sulfetos na atmosfera de seus respectivos ambientes internos. As demais unidades de tratamento apresentam resultados que se referem ao ambiente aberto não possuem laje, à exceção do TL. Portanto, os resultados da Figura 4.5 proporcionam uma boa caracterização da agressividade da atmosfera ao concreto de cada unidade.

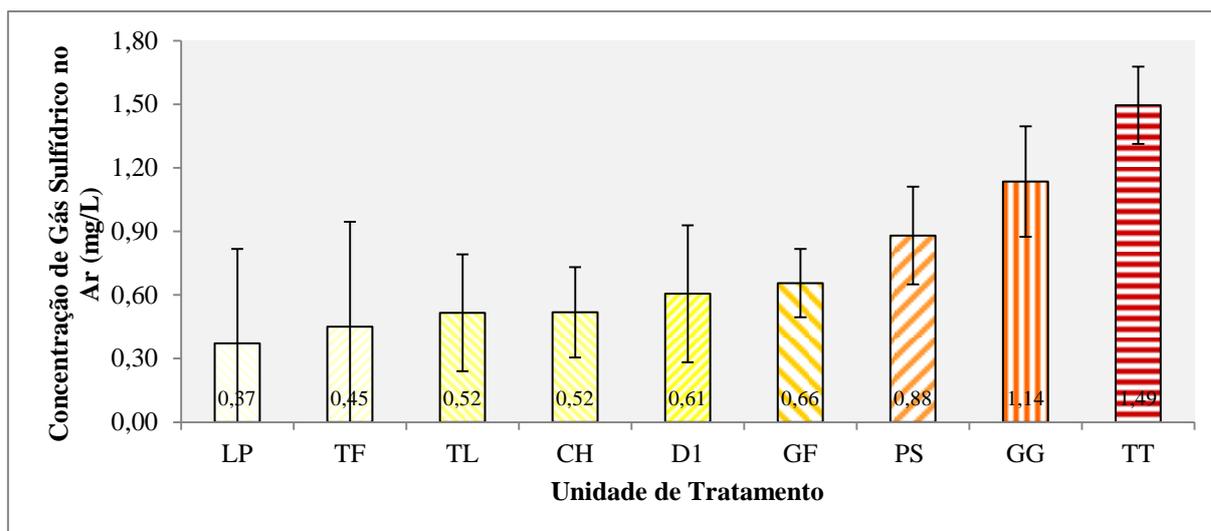
Conforme exposto na metodologia, a primeira campanha da GG e PS internamente, mesmo tendo sido um pouco prejudicada por respingos, apresentaram os maiores teores de gás sulfídrico gasoso. Verifica-se neste caso que a agressividade do ambiente interno da unidade de tratamento é muito maior que no ambiente externo, o que é bastante lógico uma vez que no ambiente confinado, a mistura do gás com o ar é menor e, conseqüentemente, a concentração do gás aumenta.

Frenchen (1988¹⁴) *apud* Gostelaw *et al.* (2000) identificou em pesquisa realizada com operadores de 100 (cem) ETEs da Alemanha quais eram as unidades com maior emissão de odor. Embora seja um método subjetivo, o resultado geral mostrou que as principais fontes de

¹⁴ FRENCHEN, F. B. (1988) Odour emissions and Odour Control at Wastewater treatment plants in West Germany. **Water Science Technology**.20, 261-266.

odor estão associadas ao tratamento primário (chegada da estação), aos decantadores primários e ao processamento do lodo, o que está bastante parecido com a perspectiva observada nos resultados obtidos por SANEAGO (2018). Métodos analíticos também relacionam as maiores concentrações de sulfetos nas unidades de Tratamento Preliminar, Elevatórias, conforme citado por Silva (2007) e Chernicharo (2010).

Figura 4.5 – Gás Sulfídrico na atmosfera das Unidade de Tratamento da ETE H



Os ambientes internos das unidades GG, PS e TT apresentaram as maiores concentrações de gás sulfídrico na atmosfera e, externamente, pode-se considerar os valores obtidos na região do Limpa Fossa. Entretanto, externamente, os teores foram menores, como é possível observar comparando-se o resultado da medida interna da GG e os resultados do LP e CH que chegaram a no máximo 50% do teor encontrado internamente na GG. Isso permite inferir que a agressividade do meio é diferente quando são estudadas as faces internas e externas do elemento estrutural e isto irá ocorrer em todas as unidades de tratamento, pois internamente as condições sempre apresentam maior agressividade devido à umidade proporcionada pelo esgoto e um nível mais elevado de teor de sulfetos, ambiente extremamente favorável à ocorrência de corrosão. Ressalta-se ainda que o alto resultado do teor de sulfetos na GG tem origem da tubulação de chegada, pois o canal de chegada da estação é o ponto de liberação de gases, acumulados no interior do emissário, para o meio.

A literatura apresenta variações entre diversos autores (Tabela 4.2) e quando se compara o resultado de SANEAGO (2018) com esses autores, observa-se uma divergência ainda maior. A temperatura ar-esgoto influencia na taxa de solubilização do sulfeto que é lançado na atmosfera, portanto países mais frios podem apresentar um menor desprendimento de gás

sulfídrico na atmosfera em comparação com países com temperaturas mais tropicais.

Tabela 4.2 – Resultados da análise de sulfeto presente na atmosfera da ETE H e comparação com a literatura existente

Unidade de Tratamento	Sigla	Concentração de H ₂ S no ar (mg/L) SANEAGO (2018)	Concentração de H ₂ S no ar (mg/L) - Literatura	Autores
Limpa Fossa	LP	0,37	-	-
Tanque de Efluente Final	TF	0,45	-	-
Tanque de Armazenagem de Lodo	TL	0,52	0,01 - 0,5	Degremont (1989 ¹⁵) <i>apud</i> Antunes (2006)
Chorume	CH	0,52	-	-
Decantador Primário	D1	0,61	0,0005	Belli <i>et al.</i> (2001 ¹⁶) <i>apud</i> Chernicharo (1997)
			0,0005 - 0,001	Degremont (1989 ¹⁵) <i>apud</i> Antunes (2006)
Grade Fina - Tratamento Primário	GF	0,66	0,0035	Bohn (1993 ¹⁷) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
			0,0028 – 0,0515	Al-Shammiri (2004 ¹⁸) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
			0,001 - 0,003	Degremont (1989 ¹⁵) <i>apud</i> Antunes (2006)
Elevatória	PS	0,88	0,0048	Bohn (1993 ¹⁷) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
			0,0057	Silva (2007 ¹⁶) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
			0,001 - 0,003	Silva (2007 ¹⁹) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
Grade Grossa - Tratamento Primário	GG	1,14	0,0035	Bohn (1993 ¹⁷) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
			0,0028 – 0,0515	Al-Shammiri (2004 ¹⁸) <i>apud</i> Chernicharo (2010)
			0,001 - 0,003	Degremont (1989 ¹⁵) <i>apud</i> Antunes, (2006)
Tanque de Transição	TT	1,50	-	-

A Figura 4.6 apresenta os resultados médios da concentração de ácido sulfídrico no ar juntamente com a temperatura ambiente ao longo do ano. O teor de gás sulfídrico na atmosfera apresentou seu maior indicador no mês mais quente do ano, entretanto, os dados coletados não apresentaram uma boa correlação direta com a temperatura ambiente, conforme

¹⁵ DEGREMONT (1989). *Memento Technique de L'Eau* (9ª Ed.). Degremont.

¹⁶ BELLI FILHO, P.; COSTA, R. H. R.; GONÇALVES, R. F.; CORAUCCI FILHO B.; LISBOA, H. M. *Tratamento de odores em sistemas de esgotos sanitários*. In: CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). Pós tratamento de efluentes de reatores anaeróbios, Capítulo 8 – 455 – 490. FINEP/PROSAB, Belo Horizonte, 544 p.

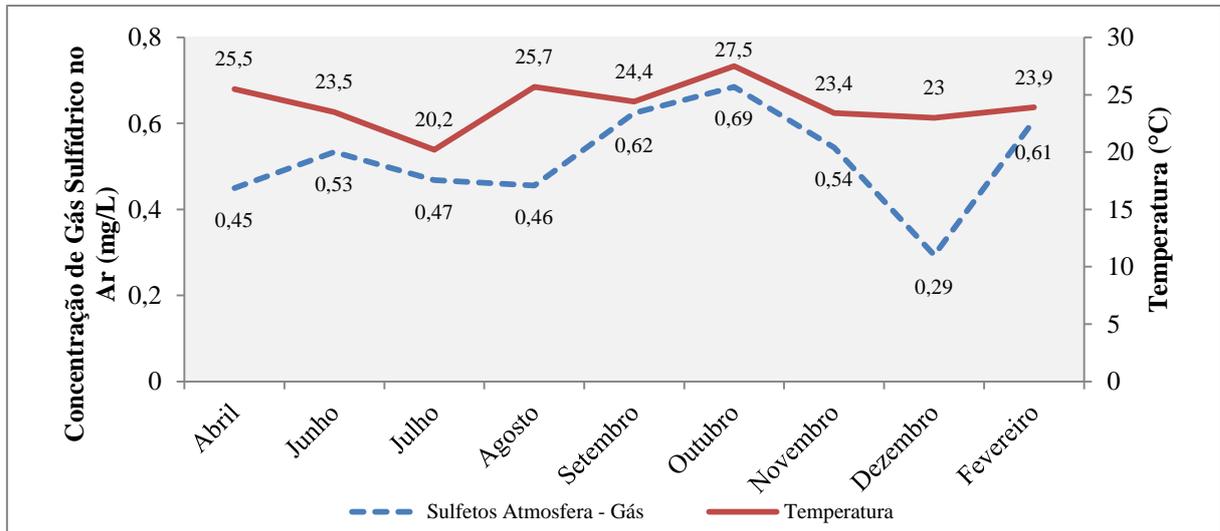
¹⁷ BOHN H.L. *Bioprocessing of organic gases in waste air*. *Symposium on Bioremediation and Bioprocessing*. In: 205th NATIONAL MEETING. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, Denver, p. 287-289, 1993.

¹⁸ AL-SHAMMIRI, M. *Hydrogen sulfide emission from the Ardiyah sewage treatment plant in Kuwait*, *Desalination*, v. 170, p. 1-13, 2004.

¹⁹ SILVA, M.B., et al. *Comparação do desempenho de diferentes filtros biológicos na remoção de H₂S do ar em estações de tratamento de esgoto sanitário*. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Belo Horizonte, ABES, 2007.

informa a literatura, isto se deve talvez porque a temperatura não foi o fator mais preponderante para liberação de H_2S visto que a emissão de sulfetos para o ar também depende da turbulência do efluente, pH e oxigênio dissolvido e a variação de temperatura foi não foi alta.

Figura 4.6 – H_2S - Gás (mg/L) x Temperatura Ambiente

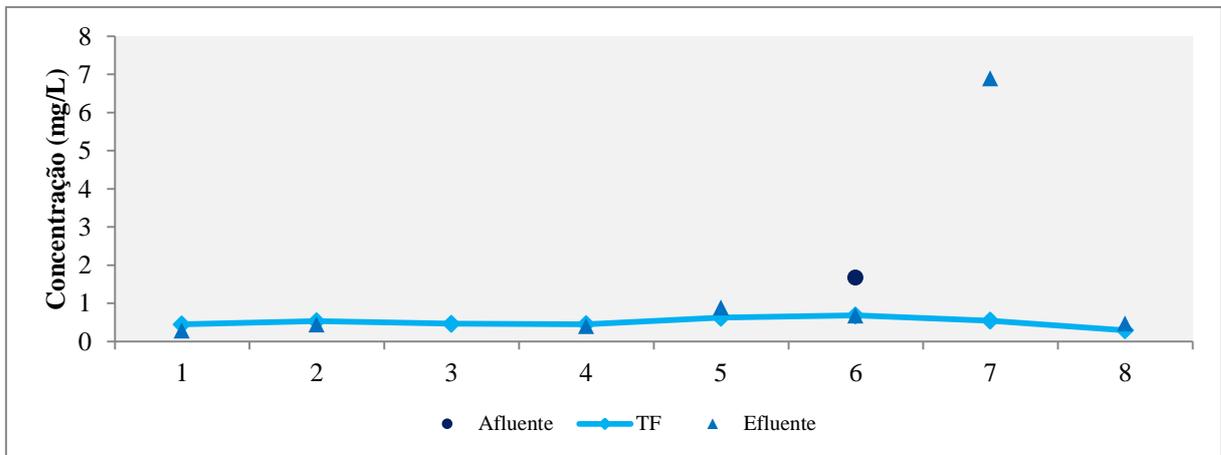


Como o aumento da temperatura pode provocar maior liberação de sulfeto para a atmosfera, a agressividade do meio conseqüentemente será maior. Portanto, ETEs localizadas em regiões mais quentes podem estar sujeitas a um nível de degradação maior do que ETEs de regiões mais frias devido à influência da temperatura na produção e liberação de sulfetos para o ambiente, embora a temperatura não seja o único fator a influenciar na acidificação da atmosfera.

A Figura 4.7 mostra os resultados de sulfetos no esgoto e na atmosfera. Observa-se que o Sulfeto afluente à ETE em alguns meses do ano se apresentou um tanto mais elevado, isto pode ser ocasionado por um maior tempo de detenção na rede ou maiores lançamentos de efluentes à base de sulfato na rede. Observa-se ainda que os teores sulfetos no efluente líquido e na atmosfera foram muito próximos.

O TDH combinado com profundidades de lâmina de esgoto maiores influenciam indiretamente a produção de sulfetos, pois quanto mais tempo o esgoto permanece dentro de determinada unidade de tratamento, maior é o consumo do oxigênio disponível. Quando o oxigênio dissolvido se extingue, a oxidação do sulfato se torna mais intensa para obtenção de O_2 e, desta forma, quanto maior é o TDH, maior será a produção de sulfetos.

Figura 4.7 – Sulfetos (Dissolvidos no Líquido e na Atmosfera)



Na estação estudada, os tempos de detenção e as profundidades das unidades de tratamento do efluente líquido favorecem menos a anaerobiose, a literatura considera que tempos de detenção maiores que 4 horas e profundidades maiores que 4 m favorecem a ocorrência de anaerobiose (CHERNICARO, 1997).

Os decantadores são a unidade de tratamento do efluente líquido com maior TDH médio, sendo que se apresenta com amplitude entre 2 (duas) horas, quando há somente dois decantadores em operação, e 3 (três) horas, quando os três decantadores estão operando juntos, e o previsto em projeto era de 1 hora e 46 minutos. Constatou-se que seria interessante a avaliação do teor de sulfetos, sulfatos, oxigênio dissolvido, DBO e DQO avaliando a influência do tempo de detenção nesses parâmetros devido à grande variabilidade.

As demais unidades referentes à fase líquida possuem tempos de detenção hidráulica bastante baixos, como, por exemplo, o desarenador com 3 minutos, e por esse motivo não foram avaliados.

Na fase sólida, que se refere ao armazenamento e tratamento de resíduos removidos da fase líquida, o Tanque de Armazenagem de Lodo é a unidade com maiores implicações quanto ao tempo de detenção, pois possui 5 m de profundidade e pouca disponibilidade de oxigênio em seu interior, ambiente propício à digestão anaeróbia. Entretanto, não foi possível avaliar o TDH desta unidade por falta de equipamentos que fornecem informações confiáveis com relação a este parâmetro.

O nitrogênio apresenta-se com concentrações variando entre 42 e 98 mg/L no afluente e 30 e 55 mg/L no efluente. Porém, com esta estação não possui tanques de nitrificação e

desnitrificação, os danos causados pela amônia não serão discutidos nos resultados desta pesquisa.

4.3 RESULTADOS DAS ANÁLISES POR UNIDADE DE TRATAMENTO

Como a agressividade ambiental inerente à ETE H já foi apresentada e seus principais aspectos globais discutidos, optou-se por apresentar os resultados por unidade de tratamento e, assim, discutir separadamente cada uma delas com suas respectivas peculiaridades e ao final apresentar um diagnóstico completo do estado de conservação da estação. Desta forma, nos próximos tópicos são discutidos os mecanismos de deterioração em cada unidade de acordo com os processos de tratamento que ocorrem em seu interior.

Nos rótulos de dados estão apresentados os resultados dos ensaios de cobertura, resistividade elétrica, esclerometria e resistência à compressão estimada com seus respectivos desvios padrões. O único ensaio que não apresenta rótulo de dados e desvio padrão é o de medida da espessura carbonatada.

Para que fossem apresentados de forma mais didática, apresentou-se os resultados da espessura de carbonatação sobreposto às medidas de cobertura e, além disso, só foi mensurado somente um ponto de espessura carbonatada em cada um dos elementos em que foi possível avaliar a carbonatação e por esses dois motivos os resultados de carbonatação não estão apresentados de forma escrita nos rótulos de dados e desvios padrão de seus gráficos. Os resultados de carbonatação só não foram apresentados sobrepostos à espessura de cobertura quando a espessura carbonatada era superior ao cobertura, pois nesses casos os resultados de cobertura não poderiam ser visualizados.

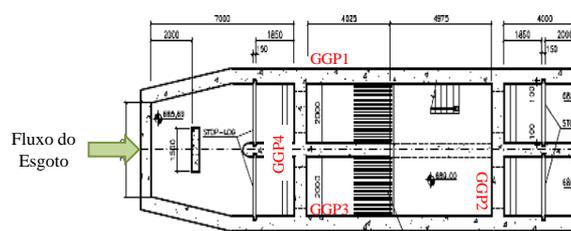
4.3.1 Grade Grossa

A Grade Grossa da ETE é uma unidade semienterrada, conforme pode ser visto na Figura 4.8. Na Figura 4.9 está apresentada a configuração em planta e os principais elementos estruturais da unidade. A parede enterrada vista na Figura 4.8 é a Parede GGP1. Nesta unidade são removidos materiais grosseiros, em sua maior parte lixo. Esta unidade é também o ponto de liberação de gases muitas vezes acumulados dentro do emissário.

Figura 4.8 – Grade Grossa da ETE H



Figura 4.9 – Croqui da Grade Grossa com elementos estruturais



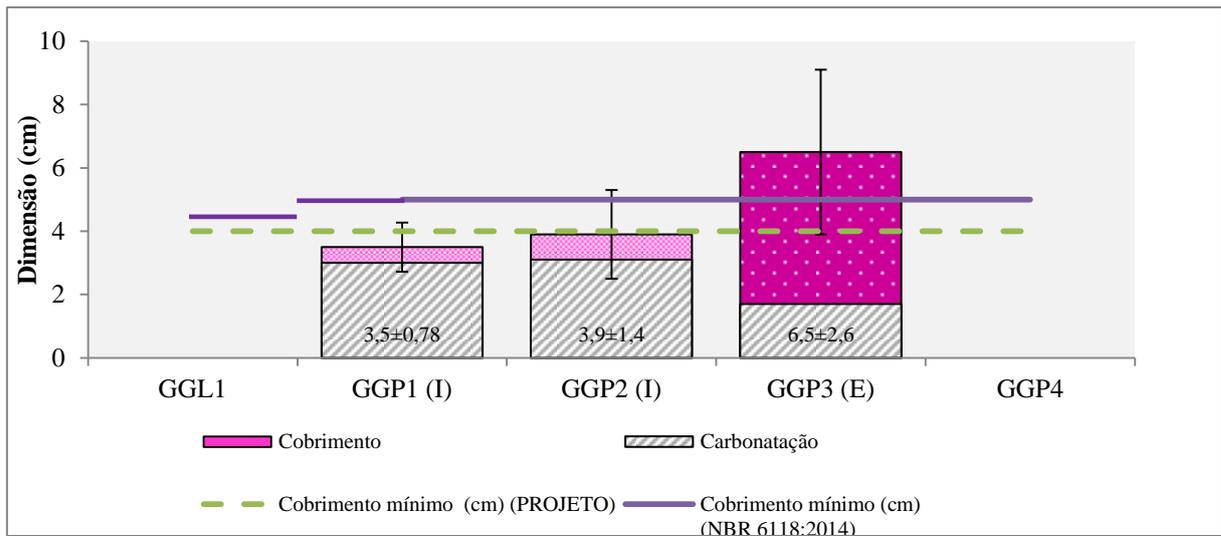
Trata-se de um espaço confinado, pois é um ambiente com pouca área para entrada e renovação do ar por causa da laje (GGL1) existente. Assim, para realização da inspeção foi necessário tomar todas as medidas de segurança necessárias com a utilização dos EPI's aplicáveis. Devido ao posicionamento da Grade Grossa e ainda à possibilidade de acesso ao interior da unidade de forma segura, alguns ensaios do concreto foram realizados internamente nas paredes GGP1 e GGP2, pois somente nessas duas paredes foi possível o contato direto. Salienta-se ainda que não foi possível investigar todos os elementos de concreto existentes nesta unidade pois havia ainda uma câmara isolada na parte frontal da grade que não permitia nenhum tipo de acesso, assim para simplificar foram adotados como elementos da Grade Grossa somente os ilustrados em vermelho na Figura 4.9.

A Figura 4.10 mostra os cobrimentos detectados e as profundidades carbonatadas, sendo que o roxo **mais escuro** se refere à análise na **face externa** do elemento e o roxo **mais claro**, refere-se à análise da **face interna do elemento** (este padrão será adotado para todos os gráficos). Observa-se que internamente na Grade Grossa foi detectado um cobrimento de acordo com o especificado no projeto, entretanto a frente de carbonatação está mais próxima da armadura. Já na face externa, o cobrimento é maior e a frente de carbonatação foi, aproximadamente, 50% da frente de carbonatação medida internamente.

A frente carbonatada indica a espessura do concreto em que o pH está inferior a 9. Como a região onde foi realizado o ensaio nas paredes GGP1 e GGP2 é emersa, a redução do pH pode

ter sido provocada pela agressividade do sulfeto, conforme sugerido por Felske *et al.* (2004), e não pela penetração do CO₂ já que no interior da unidade de tratamento a incidência de CO₂ é menor que externamente devido ao seu confinamento. Ou ainda há a possibilidade de que a porosidade da face interna do concreto seja maior que porosidade externa, o que também promoveria uma redução do pH do concreto maior internamente do que externamente.

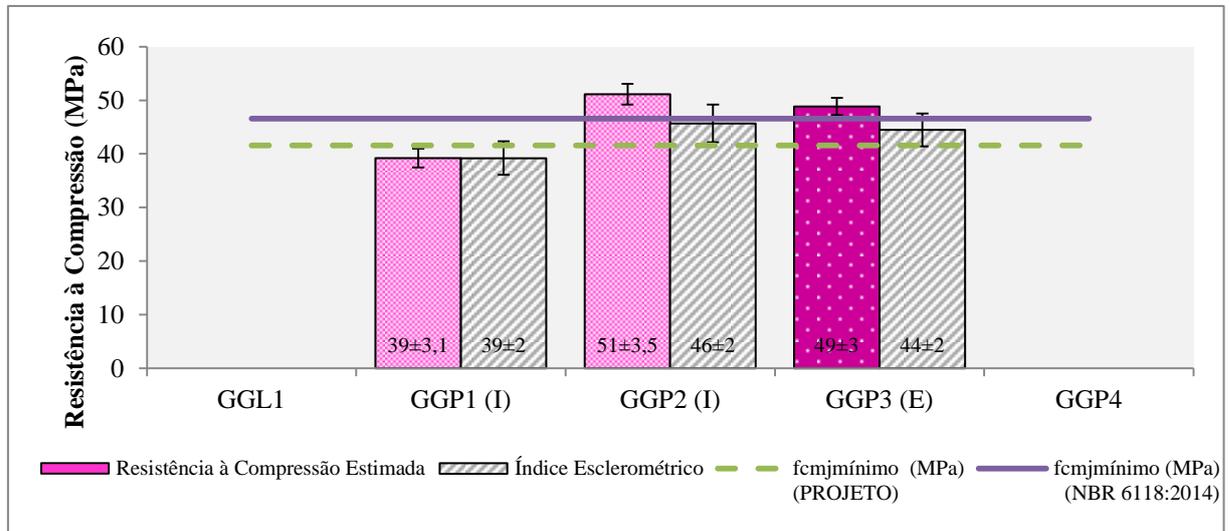
Figura 4.10 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais da Grade Grossa



*A cor roxa mais escura refere-se à análise na face externa do elemento e o roxo mais claro, refere-se à análise da face interna do elemento.

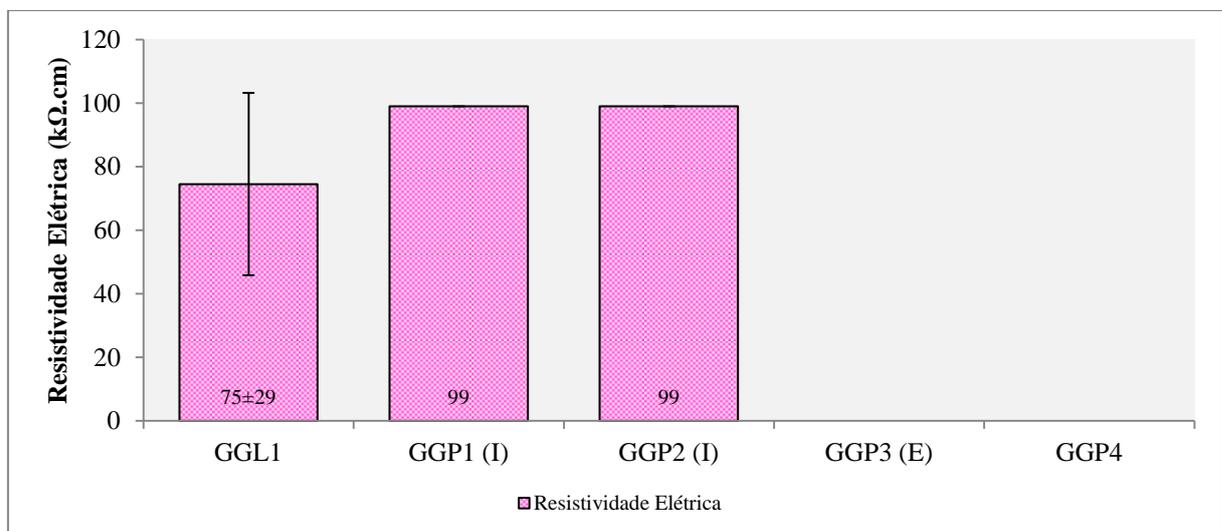
Outra análise realizada no concreto da GG foi com relação à dureza superficial em que foram obtidos os índices esclerométricos que posteriormente foram convertidos em estimativa de resistência à compressão. Os resultados, apresentados na Figura 4.11, mostram que, de maneira geral, a resistência à compressão, medida de forma indireta, está compatível com o prescrito em projeto. Pode-se dizer ainda que, com exceção da parede GGP1, os elementos estruturais estão de acordo com as normativas vigentes, embora no ano em que o projeto estrutural da estação foi finalizado, 2002, ainda estava em vigor a NBR 6118 (ABNT, 1980). Nesta versão da NBR 6118 (ABNT, 1980) não havia prescrições e requisitos mínimos básicos expressos para ambientes agressivos, deixando a cargo do projetista/construtor a escolha dos materiais e a definição do consumo mínimo e da relação água/cimento compatíveis com a boa durabilidade do concreto. Lembrando que o f_{ck} de projeto foi corrigido para f_{cmj} com desvio padrão adotado de 4 MPa para poder comparar de forma mais realista o resultado obtido, com o especificado.

Figura 4.11 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Grade Grossa



A resistividade elétrica do concreto também foi medida somente nas faces internas acessíveis, entretanto foi detectado que existe uma grande variabilidade nos resultados por interferências de vários aspectos como a umidade do concreto, a carbonatação e a redução do pH do concreto provocada pelo meio. Alguns locais do concreto são mais úmidos devido à proximidade com a superfície da lâmina do efluente e, conseqüentemente, podem apresentar uma resistividade elétrica mais baixa. Regiões mais distantes apresentaram uma maior resistividade, um dos motivos pode ser a diferença de umidade entre as regiões. A Figura 4.12 apresenta o resultado da resistividade.

Figura 4.12 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais da Grade Grossa



Uma das medidas deste experimento foi realizada exatamente em cima de uma fissura de

corrosão e a mínima resistividade que o aparelho encontrou foi de 28 k Ω .cm, o que contraria a literatura que prevê resistividades de 8 a 12 k Ω .cm (PULLAR-Strecker, 1987) ou menor que 5 k Ω .cm quando há alta probabilidade de corrosão (CEB 192, 1989). Verificou-se que embora este ensaio possua muitas vantagens na avaliação de corrosão de estruturas, seus resultados possuem maior coerência em ambientes controlados de laboratório, pois em pesquisas de campo, a alta quantidade de variáveis pode interferir fortemente nos resultados.

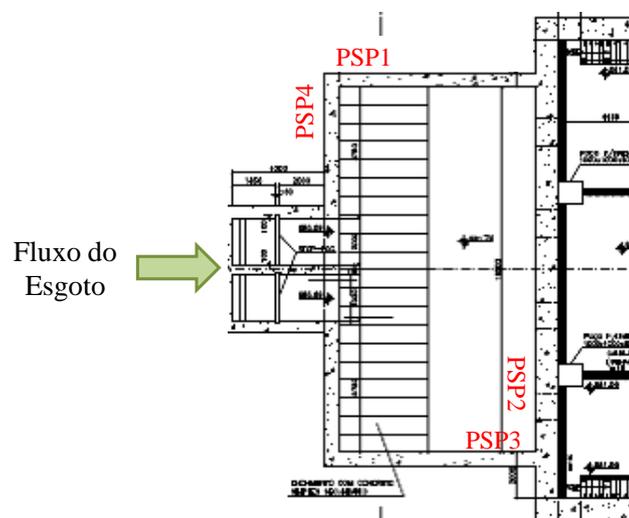
4.3.2 Poço de Sucção

O Poço de Sucção (PS) da ETE está ilustrado na Figura 4.13, assim como uma planta que mostra seus elementos estruturais (Figura 4.14). Essa também é uma unidade semienterrada, o que dificultou a realização das análises em alguns de seus componentes de concreto. O poço de sucção também é uma unidade confinada pela presença da laje PSL1, e neste caso, o poço é totalmente inacessível.

Figura 4.13 – Poço de Sucção na ETE H



Figura 4.14 – Croqui do Poço de Sucção com elementos estruturais



Como particularidade do poço de sucção, cita-se a grande variação de nível que ocorre em seu interior. As bombas são programadas para serem ligadas quando um determinado NA é atingido. A Figura 4.15 apresenta a variação de nível mensalmente durante todo o ano de 2016 e 2017, os resultados foram obtidos com base nas máximas e mínimas registradas diariamente. Há momentos em que o poço se enche com uma lâmina de efluente de 14 m em seu interior e depois, como acionamento das bombas, começa a reduzir até chegar em, aproximadamente, 5 m. Além de possuir um dos ambientes internos mais agressivos da estação devido ao alto teor de gás sulfeto, a combinação da variação de nível pode trazer consequências danosas para o concreto, pois a alternância da umidade do concreto e a acidez ambiental juntamente com o fornecimento de nutrientes disponíveis, conforme citado no tópico 4.2, aceleram a ocorrência de processos patológicos. Assim, unidades em que a variação do NA é recorrente, torna-se importante a proteção superficial do concreto com impermeabilizantes à base de polímeros até pelo menos 1 m abaixo do $NA_{\text{mínimo}}$.

A Figura 4.16 apresenta a variação horária em um dia qualquer, que neste caso foi escolhido o dia 08/01/2016 para apresentar como ocorre a variação do nível dentro do poço de sucção. O poço se enche e atinge uma lâmina de efluente com 10,88 m e cinco horas depois, seu nível é reduzido até o mínimo de 4,48 m. Este dado é mostrado nesta unidade de tratamento, entretanto na grade grossa também ocorre variação de nível alcançando aproximadamente os mesmos níveis. O motivo de se apresentar os resultados somente do Poço de Sucção é que ele possui uma sonda que controla a automação do sistema de bombeamento e desta forma é possível a obtenção dos dados de NA automaticamente.

Figura 4.15 – Variação do Nível de Esgoto (NA) no Poço de Sucção ao longo dos anos de 2016 e 2017

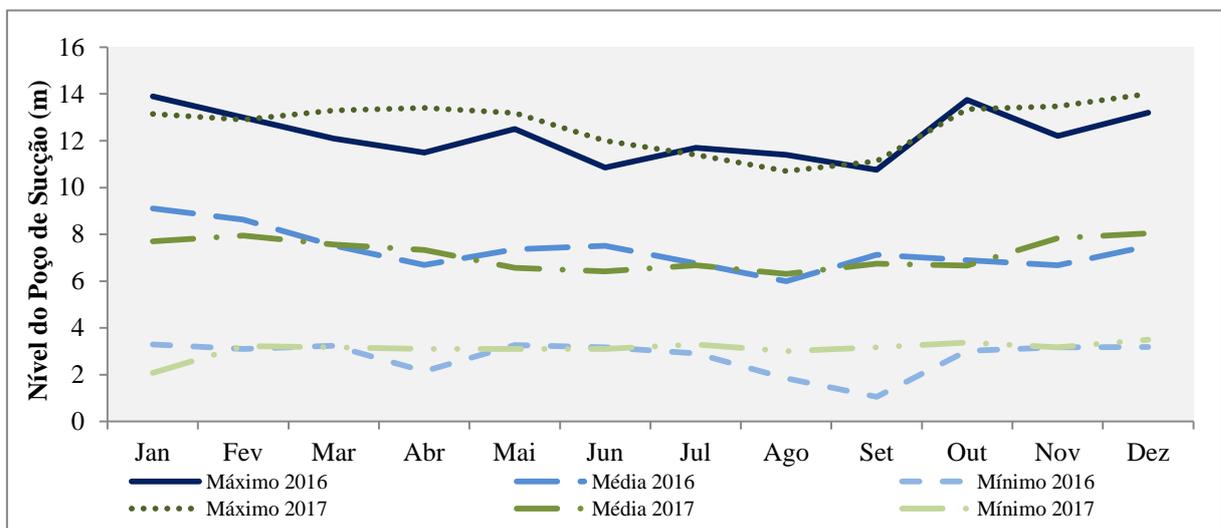
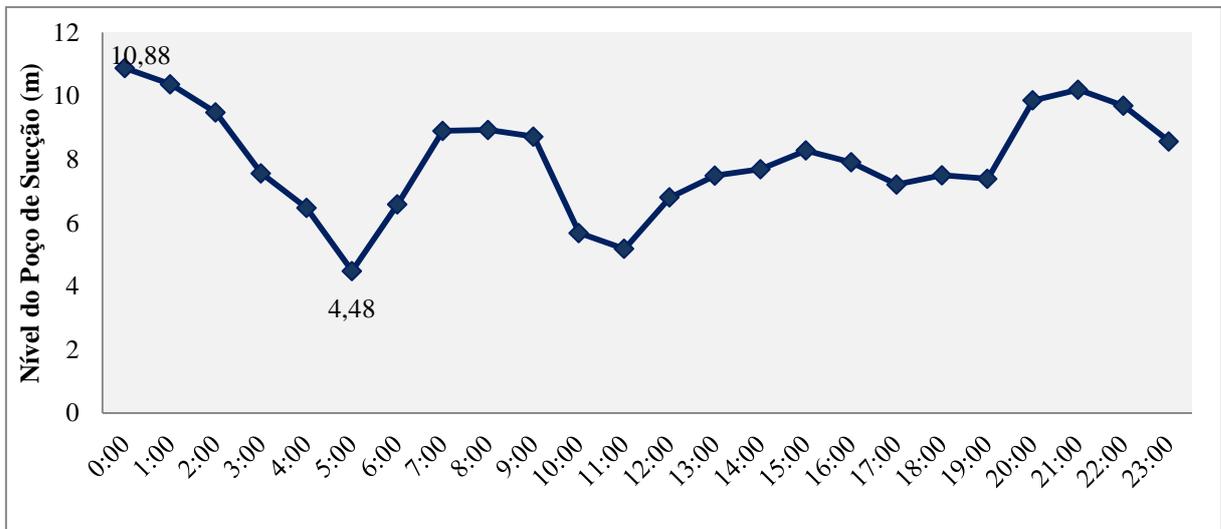


Figura 4.16 – Variação do NA no PS em 08/01/2016



No poço de sucção, só foi possível realizar análises de carbonatação, pacometria e ensaio esclerométrico nas faces externas. A resistividade foi medida nas faces internas em locais em que havia abertura que dava acesso às paredes. A Figura 4.17 exhibe os resultados de carbonatação e cobertura obtidos. A laje PSL1 foi analisada com relação à frente de carbonatação em sua face externa em um ponto em que a manta de impermeabilização estava danificada e observou-se que o resultado obtido foi bastante baixo e isso é compatível, uma vez que a manta impede o ingresso do CO_2 ao interior do concreto. Entretanto, não foi possível realizar o ensaio de pacometria na laje devido às camadas do sistema de impermeabilização. A parede PSP3 apresentou cobertura na região aferida abaixo do recomendado em projeto e também pela norma NBR 6118 (2014). O cobertura é a proteção física do concreto e, desta forma, processos executivos precisam garantir que eles atendam às especificações para que esse requisito de durabilidade contribua com a vida útil da estação de tratamento. Nas estações de tratamento de esgoto, torna-se ainda mais imperioso um rigoroso controle de qualidade, principalmente nas faces internas, durante a execução da obra devido às grandes dificuldades de acesso para execução de manutenções e os grandes impactos ambientais que podem ser causados em caso de interregno da ETE.

Assim como na grade grossa, os elementos estruturais do poço de sucção apresentaram características de resistência compatíveis com a normalização em vigência e com o projeto, o que se mostra como um aspecto muito positivo para a conservação da estação, conforme apresentado na Figura 4.18.

Figura 4.17 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Poço de Sucção

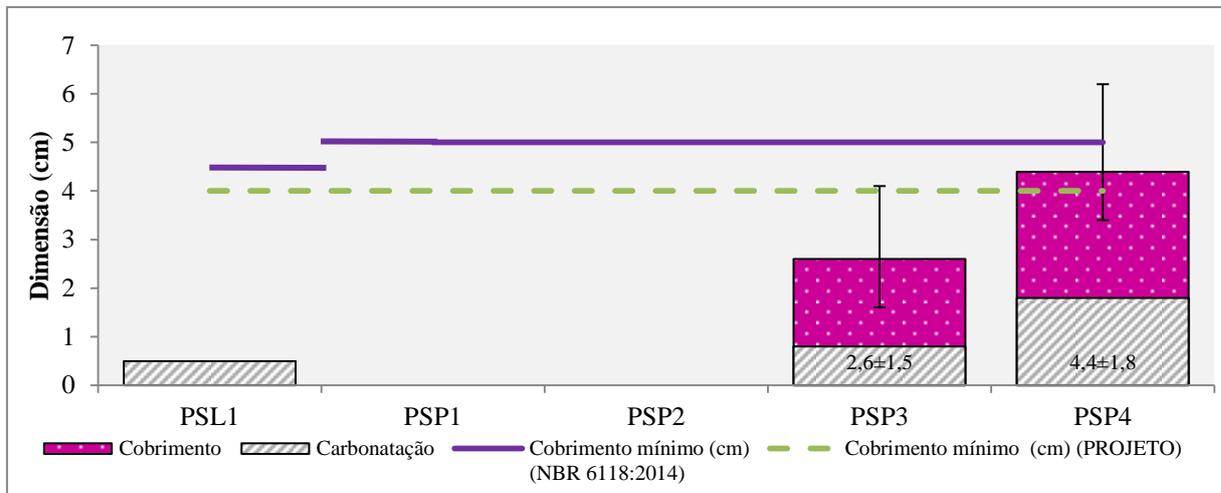
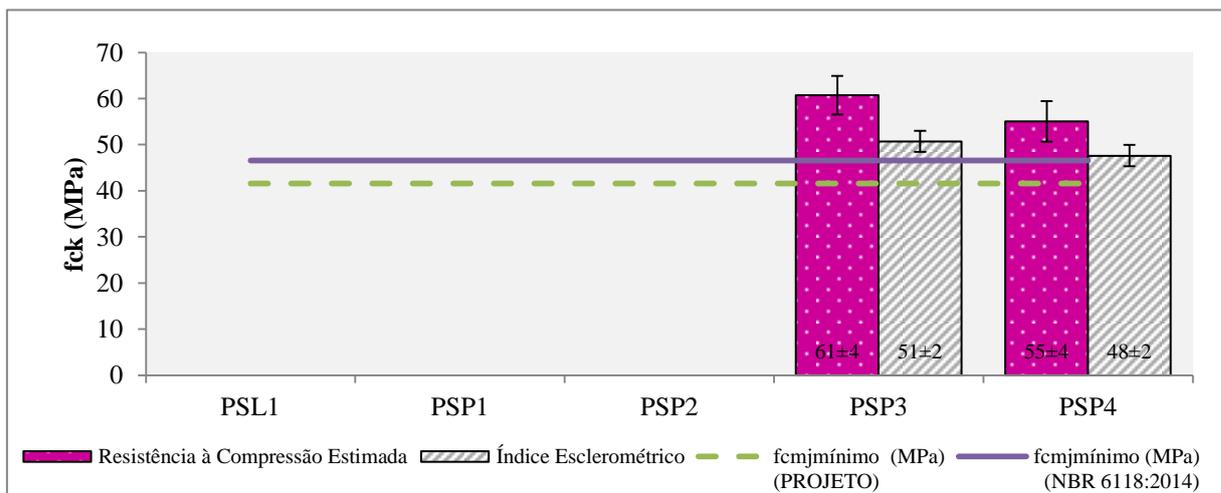
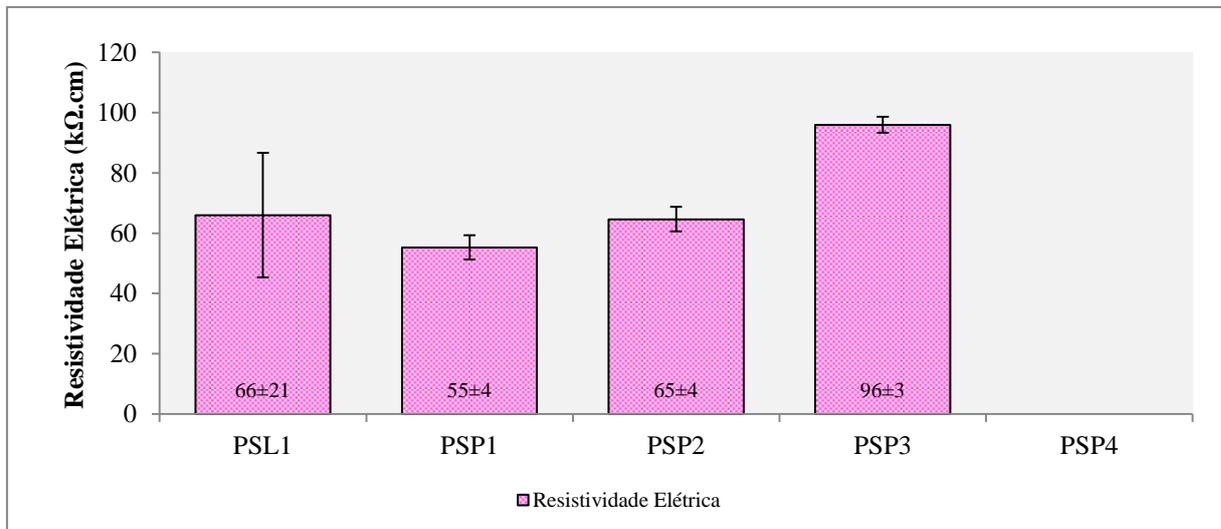


Figura 4.18 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Poço de Sucção



A resistividade elétrica das paredes do PS mostrou-se um pouco menor que na Grade Grossa (Figura 4.19), entretanto, nas paredes não foram detectados pontos de corrosão mesmo com valores próximos ao que foi medido em cima de um local que exibia sintomas de corrosão na GGL1 da Grade Grossa.

Figura 4.19 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Poço de Sucção



A menor resistividade pode ser proveniente da redução do pH do concreto, haja vista que o teor de sulfetos na atmosfera interna desta unidade também foi mais elevado se comparado com as demais. A laje apresentou maior variabilidade dos resultados e houve pontos em que a medição foi realizada em locais com sinais de corrosão e, mesmo assim, a resistividade mínima foi de 47 kΩ.cm.

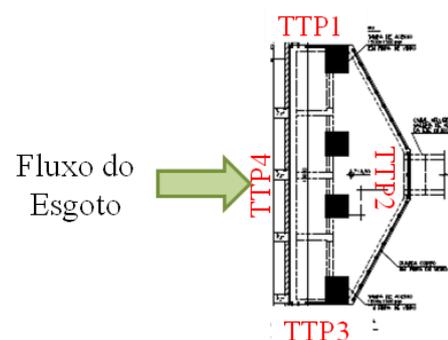
4.3.3 Tanque de Transição

O Tanque de Transição proporciona a mudança de fluxo do efluente que passa do regime de escoamento forçado (bombeado) para o regime de escoamento por gravidade. Assim, neste tanque há uma grande turbulência do esgoto bombeado que chega e será conduzido para as unidades de tratamento primário. A Figura 4.20 apresenta uma visão geral da unidade de tratamento e o desenho de sua planta é apresentado na Figura 4.21.

Figura 4.20 – Tanque de Transição da ETE H



Figura 4.21 – Croqui do Tanque de Transição com elementos estruturais



O Tanque de Transição se apresentou como uma das unidades mais preocupantes de toda a estação. Além de apresentar alguns pontos de corrosão na laje TTL1 dada a alta agressividade ambiental proporcionada pela emissão de gás sulfídrico no ambiente interno confinado devido a agitação do fluxo, ela apresenta trincas na viga de base (Figura 4.22). As fissuras sugerem que foram causadas por esforço cortante. Foi realizado um selo de gesso para verificar se a fissura já havia se estabilizado e, após alguns meses, o gesso trincou, sugerindo que a fissura continua ativa.

Observou-se também que ocorreu uma movimentação da unidade de tratamento, pois os rufos instalados na interface do TT com a Estação Elevatória de Esgoto se distanciaram da laje, conforme pode ser verificado na Figura 4.23 e também as tubulações de recalque que são acopladas à parede TTP4 mostraram que houve movimentação. A concessionária tem monitorado por meio de topografia a movimentação da estrutura.

Figura 4.22 – Fissuras na parede TTP3 do Taque de Transição



Figura 4.23 – Movimentação verificada no Tanque de Transição



Existe a possibilidade de existência de uma infiltração internamente, uma vez que é possível ouvir um chiado de água ao se aproximar os ouvidos da parede TTP3 da unidade que é a mesma em que apareceram as fissuras características de cisalhamento.

Além disso, os resultados mostraram ainda que seus elementos estruturais se encontram com uma frente de carbonatação bastante avançada e que já superou o cobrimento médio em todas as suas paredes, como é possível observar claramente na Figura 4.24. A média de cobrimento ainda mostra que essa especificação de projeto não foi respeitada o que contribui ainda mais para um nível de deterioração e aceleração da redução da vida útil.

Durante a realização do ensaio de carbonatação na parede TTP1, como a frente de

carbonatação já ultrapassou toda a espessura de cobrimento e alcançou a armadura, é possível afirmar que a armadura se encontra despассивada e sujeita à corrosão. Essa afirmação pode ser verificada na Figura 4.25 que mostra inclusive uma película de óxidos de ferro depositados sobre sua superfície. A parte da armadura que se encontra sem o óxido é onde a ponta do martetele atingiu a armadura e removeu a camada superficial.

Figura 4.24 - Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Transição

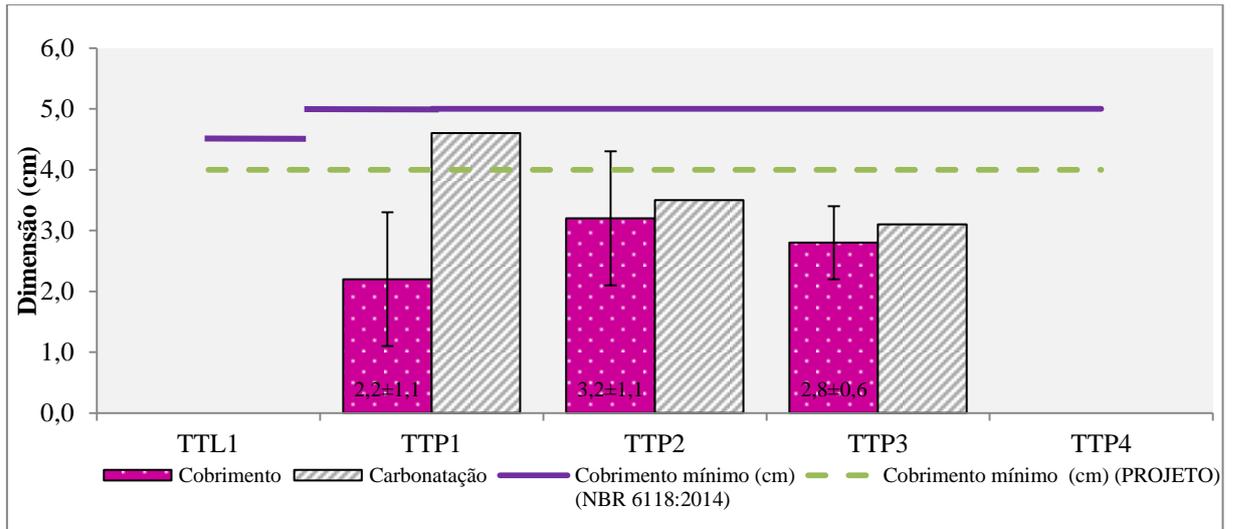


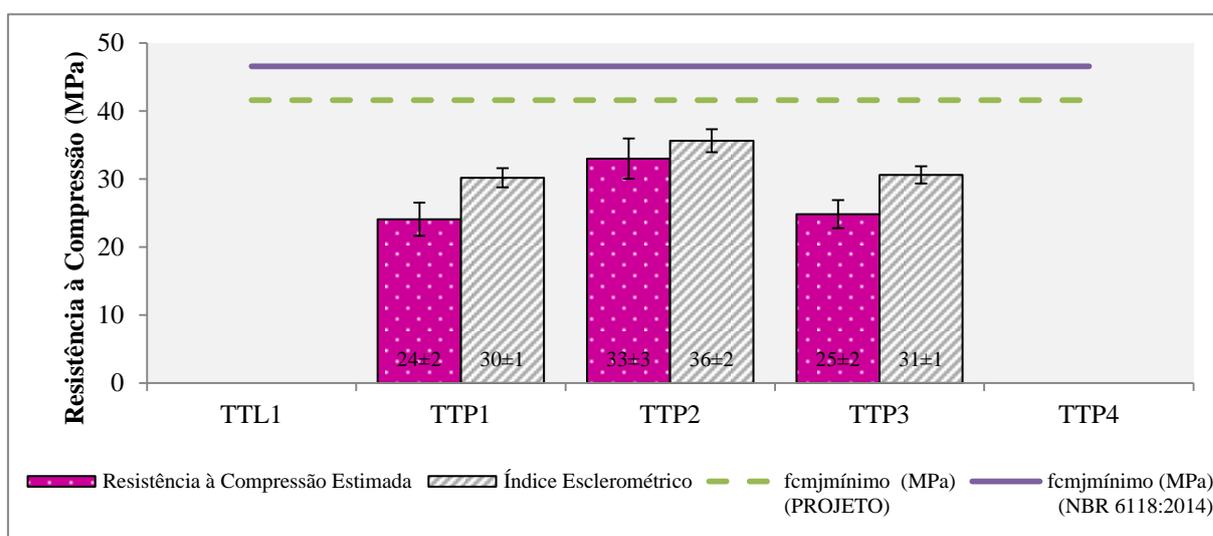
Figura 4.25 –Fratura para realização do ensaio de carbonatação na Parede TTP1 do Tanque de Transição



O ensaio de esclerometria mostrou ainda que a resistência superficial do concreto foi menor que na Grade Grossa e no Poço de Sucção, mesmo com esta unidade possuindo a mesma

especificação em projeto. A Figura 4.26 mostra que a conversão do índice esclerométrico em resistência à compressão estimada produziu valores abaixo da prescrição de projeto, chegando ao valor de 24 MPa na parede TTP3. A resistência menor, combinada com os testes de carbonatação, permitem concluir que a porosidade deste concreto é maior e, como a menor porosidade é um dos parâmetros mais importantes para garantia da vida útil das estruturas, essa unidade deverá ser monitorada e protegida ao máximo.

Figura 4.26 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Transição



Portanto, esta unidade necessita de medidas urgentes para controlar o processo de deterioração. Entretanto, um desafio para realização de manutenções de caráter preventivo e corretivo nesta unidade é que por ela passa todo o esgoto da estação e não há outra unidade em paralelo com a mesma finalidade para que seu uso possa ser descontinuado com a intenção de realização de uma investigação e operações significativas de manutenção.

O ensaio de resistividade elétrica só foi realizado na laje TTL1 (Figura 4.27) porque as paredes internas do tanque encontram-se cobertas com argamassa, como é possível confirmar na Figura 4.28. Alguns pontos de corrosão da armadura encontrados nas lajes da GG, PS e TT possuem características em comum: geralmente eles acontecem na face inferior dos elementos e principalmente próximos às bordas (Figura 4.28).

Figura 4.27 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Tanque de Transição

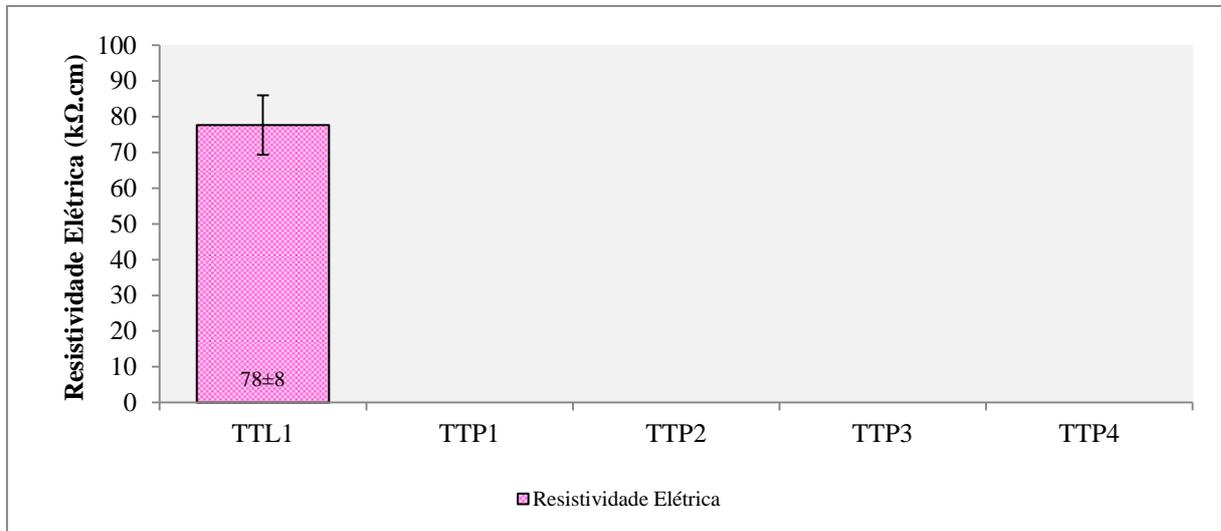


Figura 4.28 – Imagem interna do Tanque de Transição que mostra paredes cobertas por argamassa



A explicação para essa configuração é a maior disponibilidade de oxigênio, combinada com a presença do gás sulfídrico que promovem uma agressividade maior nessas regiões e ainda um cobrimento prejudicado, pois muitas vezes observa-se nas regiões corroídas que o cobrimento existente é um tanto inferior ao recomendado por norma assim, consequentemente, um conjunto de fatores que favorece a ocorrência de corrosão do aço.

4.3.4 Canal de Chegada ao Tratamento Primário

Após passagem pelo tanque de transição, o esgoto é encaminhado para o canal de chegada do tratamento primário (CC) por meio de uma tubulação afogada e inacessível. O CC fica localizado na mesma estrutura que a grade fina, caixa de areia e calha Parshall e, portanto, estas unidades já são aqui apresentadas. A Figura 4.29 apresenta o conjunto das unidades de tratamento e a Figura 4.30 mostra a configuração em planta do Canal de Chegada ao Tratamento Primário.

Figura 4.29 – Edifício que comporta as unidades de pré-tratamento da ETE H

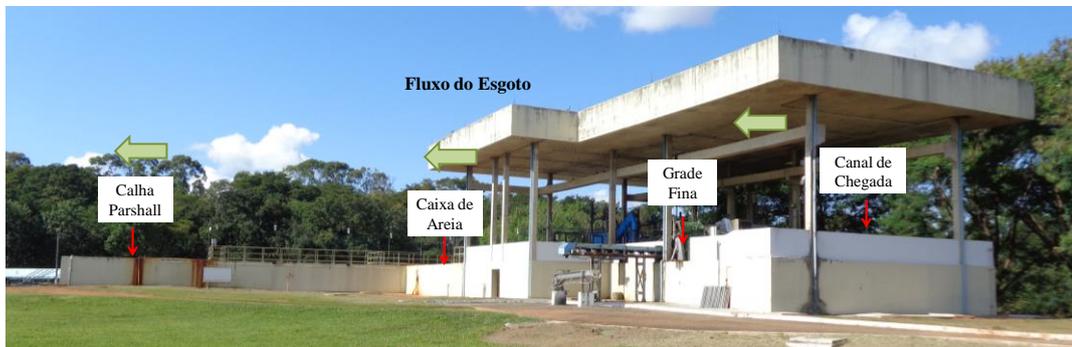
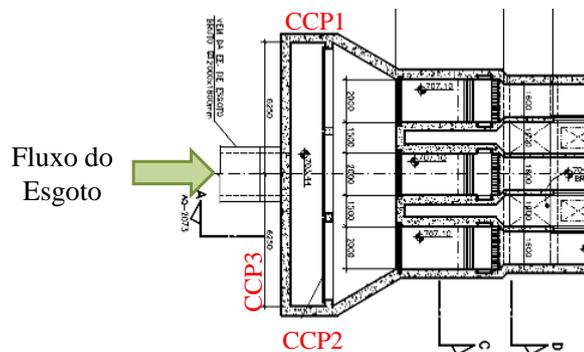


Figura 4.30 – Croqui do Canal de Chegada ao Tratamento Primário com elementos estruturais

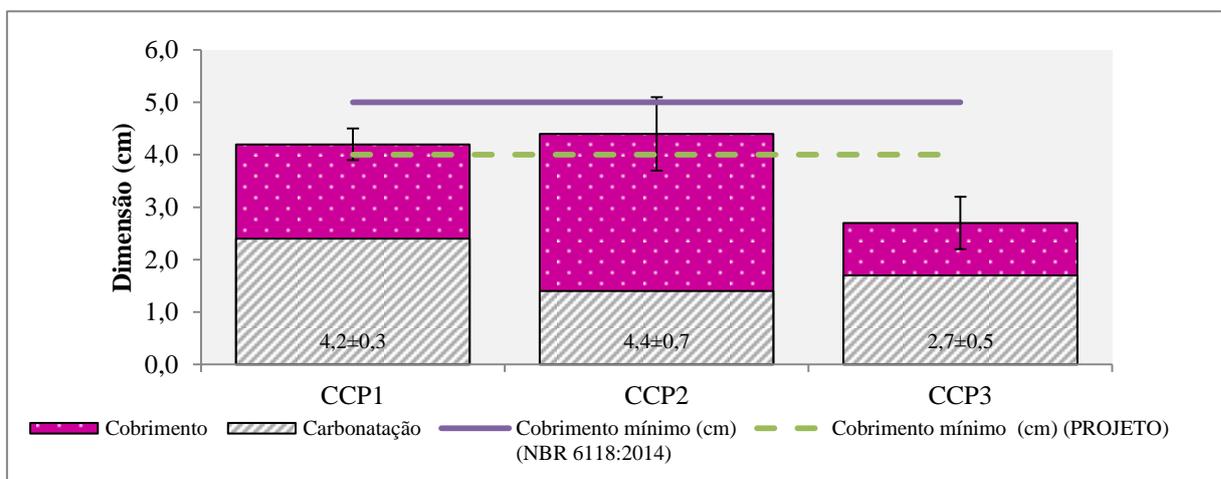


Nesta unidade não ocorre nenhum processo de tratamento. É apenas o canal que recebe o esgoto proveniente do Tanque de Transição e encaminha para a Grade Fina. O esgoto chega com um pouco de turbulência, porém o canal não possui laje de cobertura, o que permite que haja uma maior diluição dos gases na atmosfera. Unidades que possuem lajes de cobertura, apresentam um microclima de maior agressividade ao concreto, pois ocorre uma maior concentração de gases nocivos ao concreto.

A Figura 4.31 mostra os resultados referentes ao cobrimento e espessura de carbonatação

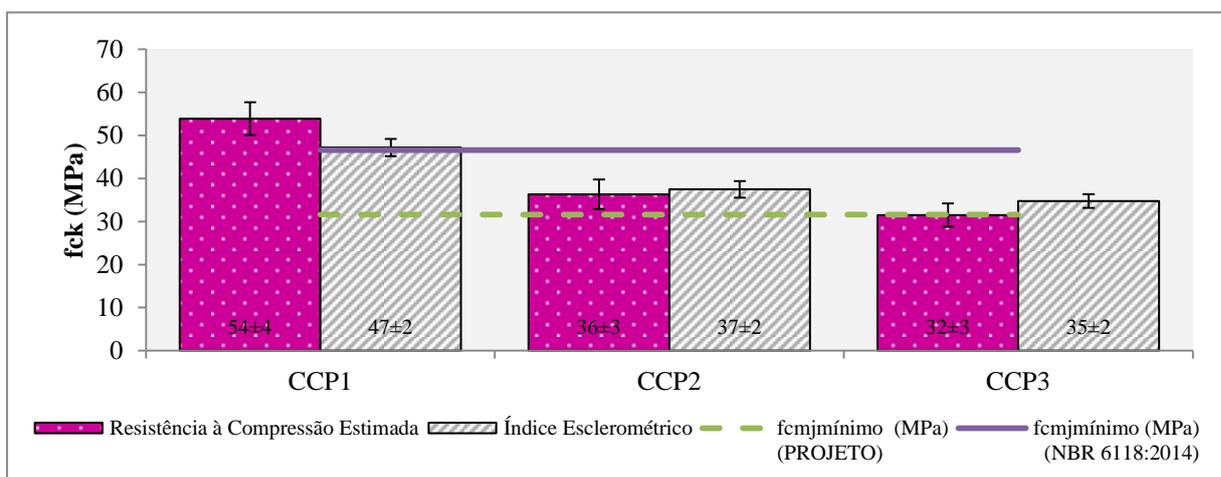
externos do Canal de Chegada. Esta unidade se apresenta, de forma geral, com condições favoráveis à conservação das estruturas de concreto, uma vez que as paredes CCP1 e CCP2 atenderam às especificações do concreto prescritas em projeto. A parede CCP3 foi o elemento com menor cobrimento e com a maior espessura de carbonatação, entretanto a armadura ainda não foi alcançada pela frente de carbonatação e não foram verificadas manifestações patológicas graves nesta unidade.

Figura 4.31 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Canal de Chegada do Tratamento Preliminar



A resistência à compressão estimada (Figura 4.32) de forma indireta, atendeu às prescrições de projeto, entretanto, o patamar prescrito pela NBR 6118 (2014) só foi atendido pela parede CCP1.

Figura 4.32 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Canal de Chegada do Tratamento Preliminar



Foram realizados ensaios de resistividade nas paredes CCP1 e CCP2, entretanto, há um revestimento em argamassa na parte interna desse canal (Figura 4.33 e Figura 4.34) e, por este motivo, os resultados obtidos foram desprezados por não se tratarem do concreto em análise.

Figura 4.33 – Parede CCP1 do Canal de Chegada



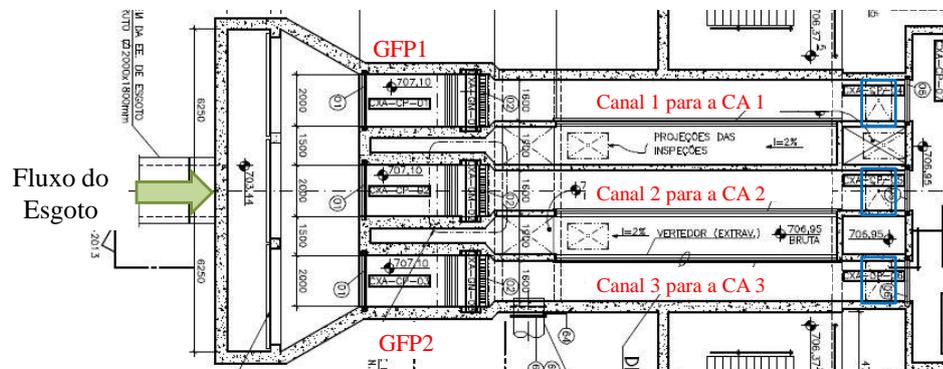
Figura 4.34 - Parede CCP2 do Canal de Chegada



4.3.5 Grade Fina e Canal de Condução à Caixa de Areia

A Grade Fina possui a configuração apresentada na Figura 4.35 e considerou-se pertencente a ela a laje existente entre o canal de chegada e ela. A laje GGL1 não é possível de ser vistoriada internamente na região entre o CC e a GF devido ao NA do esgoto ser muito próximo à face interna da GFL1 e desta forma impede a vistoria até mesmo por meio de fotografias. Entretanto, a laje foi vistoriada em região oposta por meio das aberturas de inspeção dos canais de condução ao desarenador em uma região mais adiante, indicada em azul na Figura 4.35.

Figura 4.35 – Croqui da Grade Fina com elementos estruturais

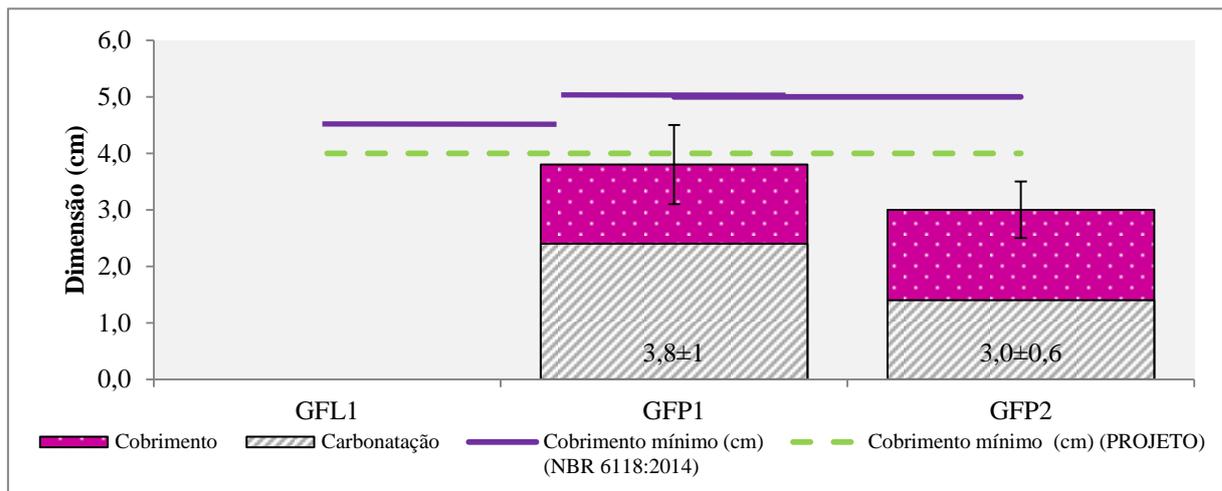


De maneira simplificada, considerou-se somente as duas paredes externas como elemento estrutural. Entretanto, como são três módulos de grade fina, com cada uma delas composta

por um canal que conduz ao desarenador, foram realizadas medidas de resistividade elétrica no interior desses canais, não tendo sido possível a realização de nenhum outro ensaio. As verificações constatadas compuseram as fichas de avaliação de maneira generalizada dentro da avaliação da GFP1 e da GFP2 para contribuírem com o cálculo do grau de deterioração.

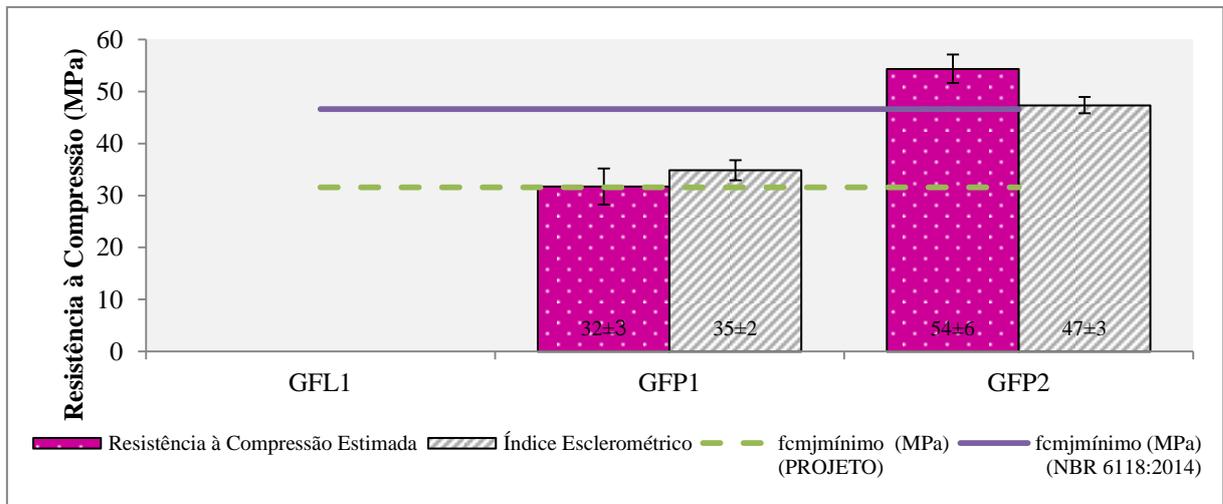
Como as paredes GFP1 e CCP1 e também as paredes GFP2 e CCP2 são interligadas, adotou-se a mesma profundidade de carbonatação para ambas visando minimizar a quantidade de danos causados aos elementos estruturais pela vistoria. O cobrimento foi medido nos quatro elementos estruturais. Os resultados estão apresentados na Figura 4.36. A parede GFP2 apresentou um cobrimento médio menor que o especificado em projeto, enquanto a parede GFP1 praticamente atendeu à especificação. A frente de carbonatação acompanhou a média do que tem sido verificado nas outras unidades de tratamento, com exceção do TT.

Figura 4.36 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais da Grade Fina



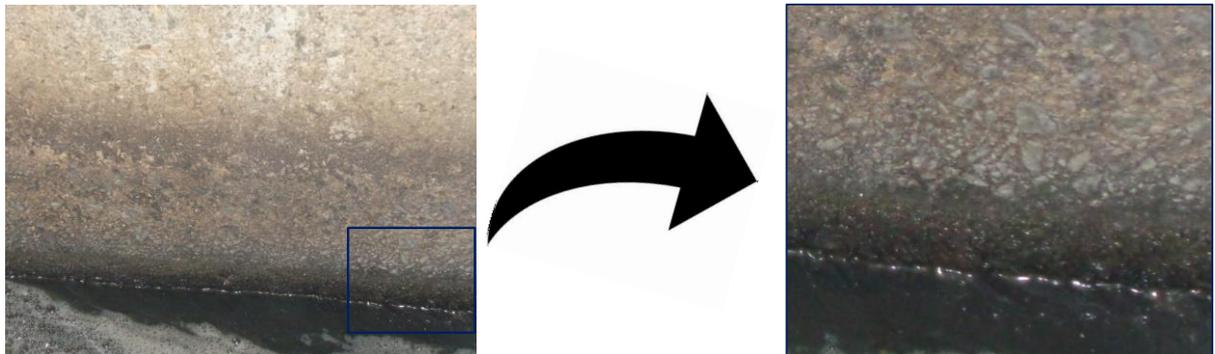
A resistência à compressão estimada (Figura 4.37) atendeu aos parâmetros de projeto embora a GFP1 não tenha atingido também o patamar mínimo de 46,6 MPa (corrigido com desvio padrão de 4 MPa) previsto na NBR 6118 (2014). Esta unidade apresenta-se de uma forma geral em bom estado de conservação.

Figura 4.37 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Grade Fina



A manifestação peculiar verificada nesta unidade refere-se ao dano “Erosão”, pois nos canais que conduzem o efluente para a caixa de areia, foram verificados os primeiros sinais deste dano. A Figura 4.38 apresenta o aspecto erosivo, em estágio inicial, encontrado nesses condutos. Nota-se que já existe uma ligeira perda de pasta de cimento com exposição superficial dos agregados graúdos nessa parede lateral de um dos canais.

Figura 4.38 – Erosão identificada no canal que conduz o efluente aos desarenadores



Pode-se considerar neste caso que há uma combinação entre mecanismos de deterioração, pois conforme visto anteriormente, a variação de nível provoca um enfraquecimento da pasta de cimento devido aos ciclos de molhagem e secagem, disponibilidade de nutrientes para bactérias, conseqüente redução do pH do meio e, por fim, a reação dos ácidos com os compostos responsáveis pela resistência do concreto. Com o ambiente preparado (pasta superficial enfraquecida), o único esforço empreendido pelos sólidos dissolvidos no esgoto é o simples atrito, carreando o agregado miúdo e provocando o dano “erosão” que é mais intenso justamente nas regiões de interface entre o concreto que fica emerso e o que fica

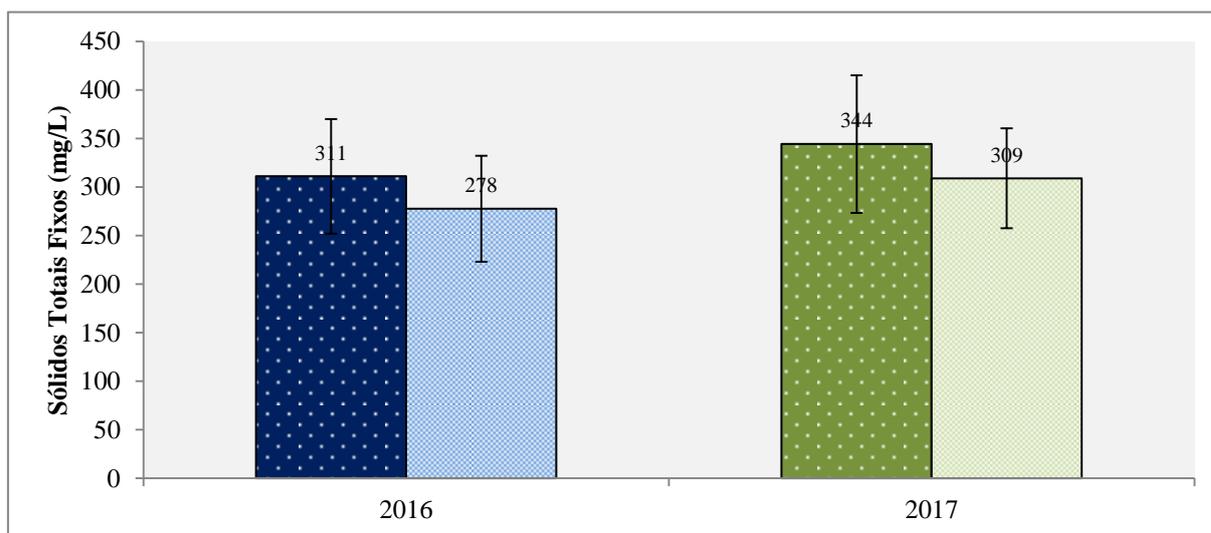
submerso.

Para auxiliar na discussão dessa manifestação, foram levantados alguns dados referentes à aspectos que influenciam na ocorrência de erosão:

- Sólidos totais fixos presentes no esgoto;
- Concentração de areia no efluente, com base na quantidade de areia removida do desarenador;
- Distribuição granulométrica dos agregados miúdos removidos do desarenador;
- Velocidade do fluido no canal de condução ao desarenador;

Os Sólidos Totais Fixos, de acordo com Von Sperling (2014), correspondem a cerca de 45% dos sólidos totais presentes no esgoto e podem variar entre 175 e 553 mg/L, segundo Metcalf e Eddy (2003). A Figura 4.39 apresenta o resultado médio obtido na ETE H, em 2016 e 2017 podendo ser classificadas suas concentrações de sólidos totais fixos, de acordo com Metcalf e Eddy (2003) como de concentração média. Ressalta-se ainda que desta média encontrada, em torno de 5% corresponde aos sólidos suspensos fixos, onde a areia se enquadra. Quanto maior for a concentração de sólidos totais fixos, maior será a probabilidade de aumento da concentração de materiais de elevada dureza que podem danificar o concreto.

Figura 4.39 – Média de Sólidos Totais Fixos - Afluente (escuro) e Efluente (claro)



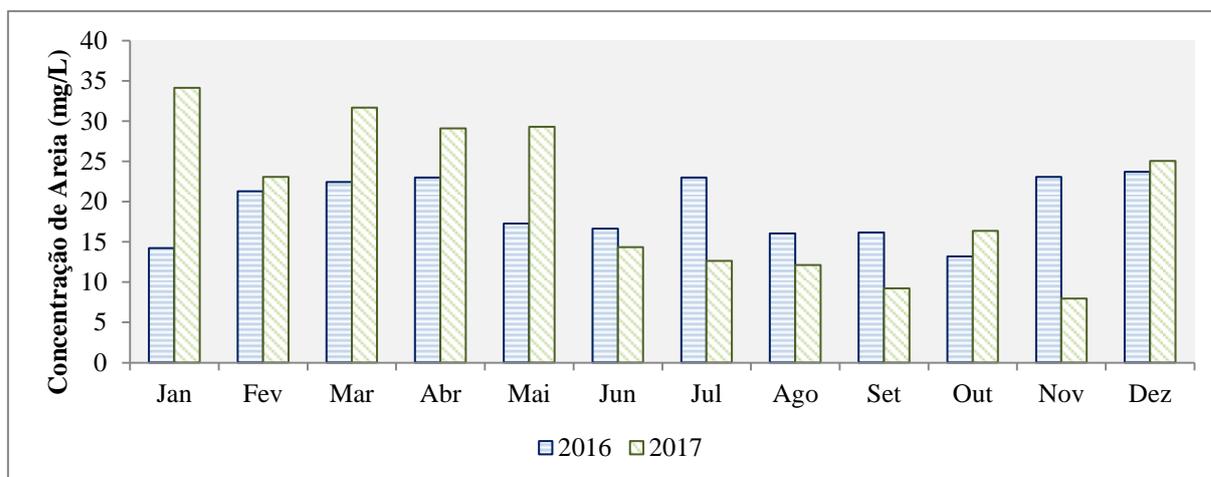
A Figura 4.40 mostra a concentração de areia removida do desarenador com um cálculo simples onde a quantidade de areia total removida no mês foi dividida pelo volume de esgoto

total tratado naquele mesmo mês. Camp (1942²⁰) *apud* Prado e Campos (2008) salienta que misturado à areia removida do desarenador encontram-se partículas sólidas de diversos tamanhos e tipos como areia, silte, pó de carvão, cinzas, pó de café, sementes de frutas, fragmentos de ossos e casca de ovo o que permite concluir que os desarenadores são responsáveis pela remoção de partículas discretas com alta velocidade de sedimentação.

Deste volume de areia extraído, dados fornecidos pela empresa de saneamento mostram que os sólidos voláteis (matéria orgânica) correspondem a 12%, em média, enquanto os sólidos totais fixos correspondem a 88%. Portanto, para fins de verificação quanto à agressividade ao concreto, esse parâmetro fornece uma informação interessante quanto à erosibilidade, pois quanto maior for a concentração de partículas de grande dureza suspensas no esgoto, maior serão as chances de ocorrência da patologia. Santos *et al.* (2006) salienta que se a velocidade for muito alta, mesmo concentrações baixíssimas podem proporcionar a ocorrência do evento “erosão”, portanto, a concentração de partículas é necessária para a investigação de danos por erosão.

Prado e Campos (2008) propõem ainda uma metodologia para a quantificação de areia no esgoto sanitário e mostram em sua pesquisa que a concentração média de areia no efluente estudado está entre 20 e 73 mg/L e que esta concentração apresenta alta variabilidade horária e diária. A concentração média obtida na presente pesquisa foi de 20 mg/L, com variações entre 13 e 24 mg/L em 2016 e 8 e 34 mg/L em 2017.

Figura 4.40 – Concentração de areia no esgoto removida no Desarenador



A concentração média de areia em volume da ETE H foi de 22 L/1000 m³ de esgoto, estando

²⁰CAMP, T. R. *Grit chamber design*. Sewage Work Journal, v.14, n.2, p.368-381, March. 1942.

dentro dos parâmetros estabelecidos na literatura e abaixo do indicado em projeto que previa um volume de 40 L/1000 m³.

Prado e Campos (2009) estudaram em outra pesquisa as características granulométricas da mesma areia que quantificaram quanto à concentração no esgoto. Eles citam que existem algumas técnicas para caracterizar a distribuição granulométrica e utilizaram como metodologia a análise de imagem para determinação do tamanho das partículas. Na presente dissertação, foi adotada a técnica do peneiramento, também citada por eles e utilizada em uma pesquisa francesa, conforme mencionaram. As distribuições granulométricas obtidas por meio ensaio de granulometria da areia em laboratório especializado são as mostradas na Figura 4.41 e Figura 4.42. Os módulos de finura obtidos no ensaio da areia do desarenador em 2013 foi de 2,74 e em 2018 foi de 2,59.

O comportamento da curva granulométrica elaborada em 2013 (Figura 4.41) e da amostra retirada em 2018 (Figura 4.42) são bastante parecidos, com dimensões máximas características de 4,8 mm em ambas. A granulometria mostra ainda que entre 80% e 85 % das partículas da areia presente no esgoto e removida no desarenador possuem diâmetros menores que 0,3 mm, ou seja 300 μm . A literatura prevê a remoção de 95 % das partículas menores que 200 μm (JORDÃO; PESSÔA, 2014) nesta configuração de desarenador.

Prado e Campos (2009) encontraram resultados pela análise de imagem que mostraram que 75% das eram menores que 200 μm . Não são encontradas muitas caracterizações das partículas em pesquisas sobre erosão do concreto e na maior parte das vezes, essas pesquisas são mais direcionadas para especificação da proteção ao concreto, porém muitas indicam que o tamanho e a forma da partícula influenciam na ocorrência de erosão (CHOI; BOLANDER, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2008; KORMANN, 2002; AGUAR, 2012).

Figura 4.41 – Distribuição Granulométrica da Areia do Desarenador (SANEAGO, 2013)

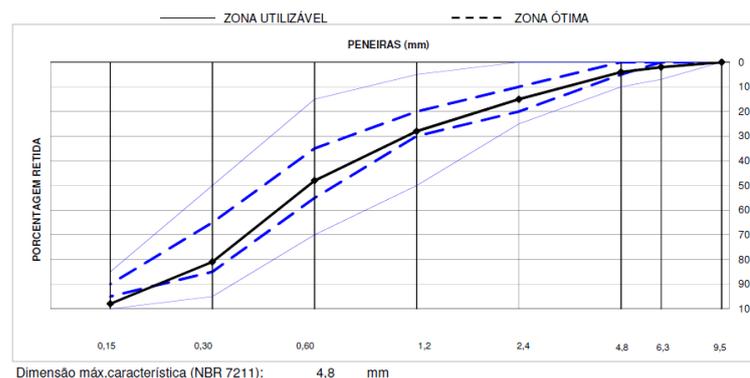
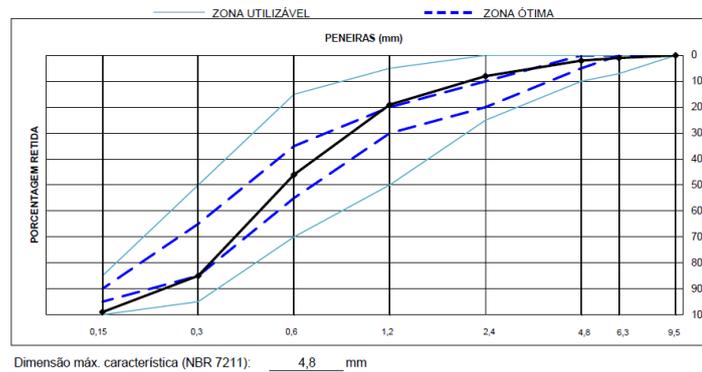


Figura 4.42 – Distribuição Granulométrica da Areia do Desarenador (SANEAGO, 2018)

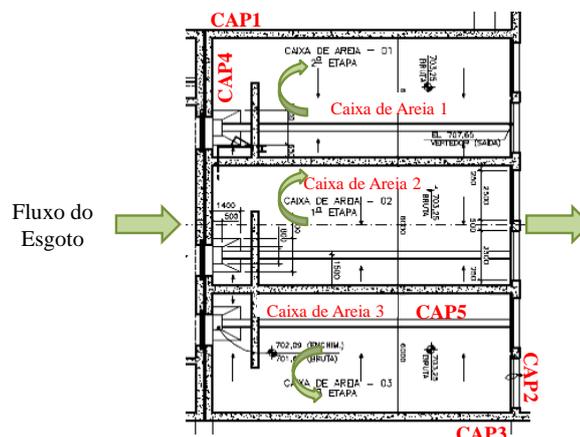


Quanto à velocidade neste canal, verificou-se de forma direta por meio da sonda eletromagnética que sua variação foi de 0,90 m/s a 1 m/s nos canais que conduzem para o desarenador. Embora não se tenha encontrado na literatura as velocidades críticas de ocorrência de erosão, é unanimidade entre os autores de que a velocidade é fator crítico na ocorrência de erosão (CHOI; BOLANDER, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2008; KORMANN, 2002; AGUAR, 2012) e no caso estudado, verifica-se que partículas com as características e concentrações encontradas, a uma velocidade de 1 m/s, o princípio de erosão foi constatado.

4.3.6 Desarenador ou Caixa de Areia

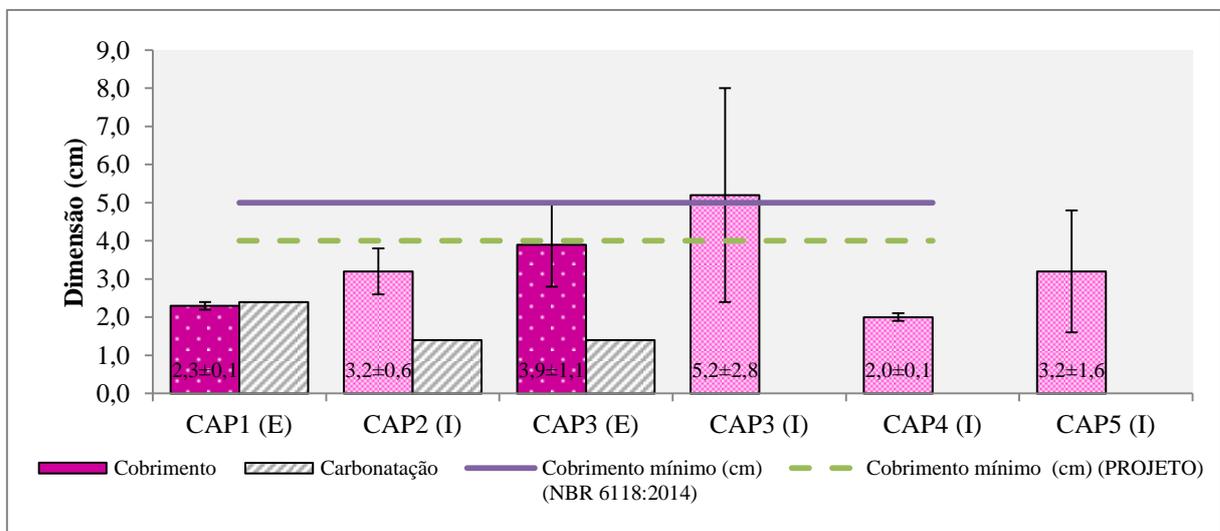
O Desarenador também é composto por três unidades em paralelo, conforme pode ser verificado na Figura 4.43. Esta caixa de areia é do tipo aerada, portanto promovem um fluxo helicoidal do esgoto durante sua passagem por ela. Ela possui forma prismática com fundo inclinado no sentido depósito de areia.

Figura 4.43 – Croqui da Caixa de Areia com elementos estruturais



A Figura 4.44 explana os resultados referentes à investigação sobre a frente de carbonatação e cobrimento na unidade. A caixa de areia 3 foi inspecionada internamente e são também apresentados seus resultados. Os resultados relacionados ao cobrimento na Caixa de Areia se mostraram menores do que as prescrições de projeto e norma, com exceção da face interna da CAP3 que, entretanto, apresentou uma grande variabilidade nas medidas. A frente carbonatada na parede CAP1, de acordo com a região investigada, já ultrapassou o cobrimento e alcançou a armadura, o que indica que a armadura pode estar despassivada. As profundidades carbonatadas nas paredes CAP2 e CAP3 foram próximas. O resultado da CAP2 (I) que indica a medida da espessura carbonatada internamente está localizada em região não submersa (acima do NA) e é referente à carbonatação nos testemunhos extraídos para realização do ensaio de MEV. Foi realizada uma perfuração para teste de carbonatação na parede CAP5 (I) em região submersa que foi considerada praticamente desprezível e, assim, considera-se que as regiões submersas apresentam carbonatação menor pela dificuldade de acesso do CO₂ aos poros do concreto devido à lâmina líquida do efluente.

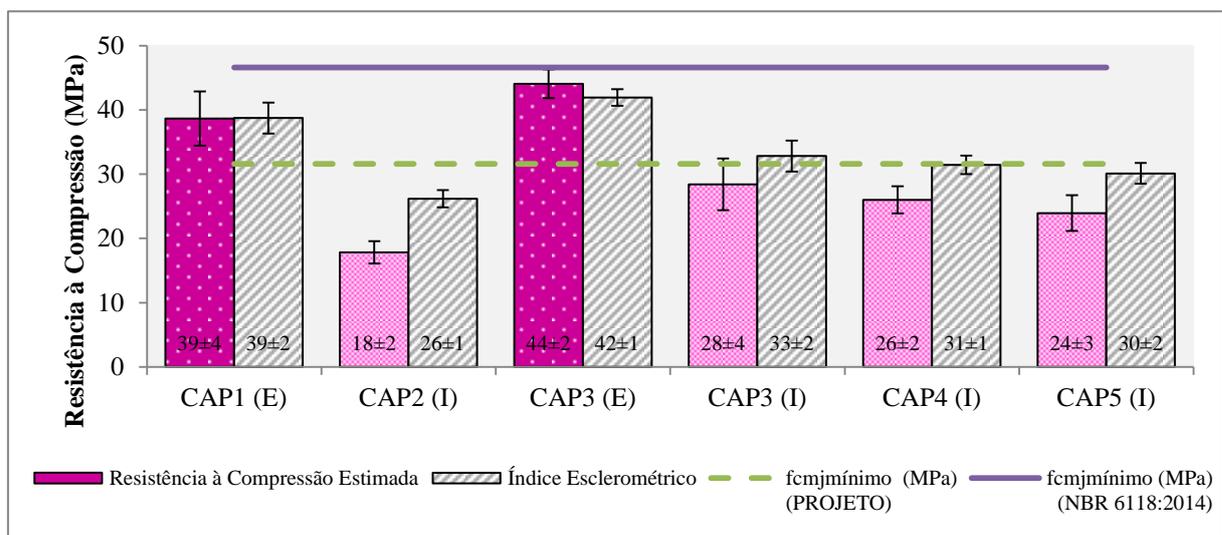
Figura 4.44 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais da Caixa de Areia



O teste de esclerometria apresentou resultados inferiores para as faces internas em detrimento das faces externas e, conseqüentemente, a resistência à compressão foi maior nas faces externas do que nas internas (Figura 4.45). Esse resultado pode ser compreendido pelos fatores que afetam o índice esclerométrico sendo que regiões carbonatadas tendem a apresentar maiores índices esclerométricos que regiões não carbonatadas devido à colmatagem dos poros, diminuição da porosidade. Como as faces internas são menos carbonatadas, espera-se que este seja um dos fatores que influenciaram no resultado. Outra hipótese é com relação à

umidade, como as faces internas onde foram realizados os ensaios operam o tempo todo submersas, há uma umidificação maior do concreto e, conseqüentemente, a secagem é mais lenta, mesmo que no dia da realização do ensaio ela estivesse superficialmente seca. Somente as medições externas apresentaram resultados atendendo às prescrições de f_{cmj} de projeto, o que pode sugerir que a superfície das faces das unidades de tratamento que permanecem em contato com o esgoto apresentam maior enfraquecimento da superfície.

Figura 4.45 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Caixa de Areia



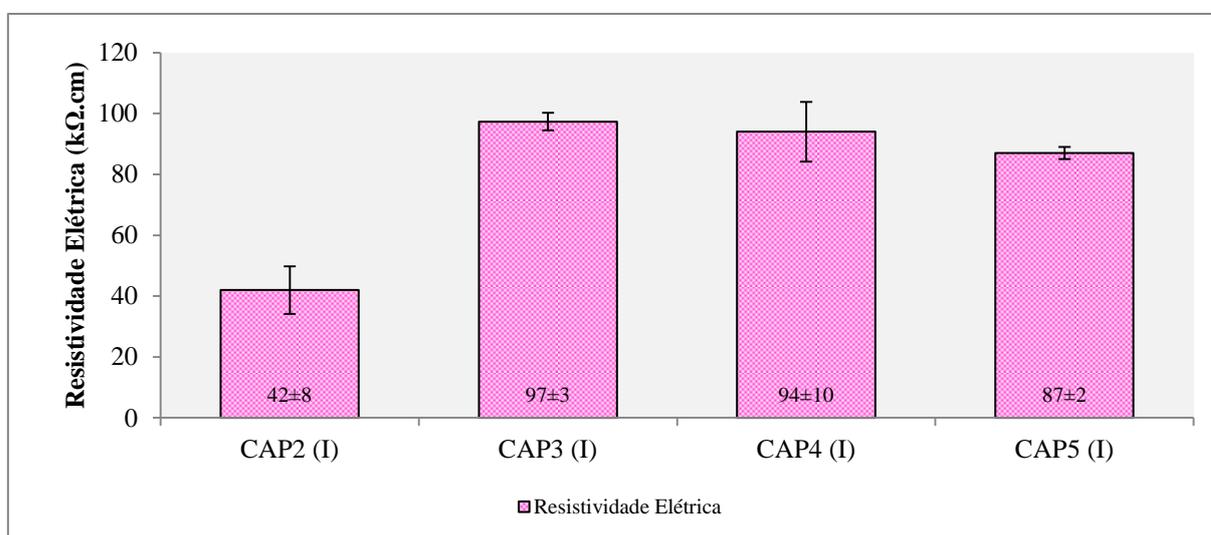
Na Figura 4.46 a Resistividade Elétrica do concreto mostrou-se menor na parede CAP2, embora não tenha sido verificado na região de ensaio nenhum sinal de corrosão. Desta forma, é provável que a estrutura da parede CAP2 seja mais porosa do que a estrutura dos outros elementos, isto porque se a porosidade aumenta, a resistência mecânica diminui e quanto maior a quantidade de poros no concreto, implica também numa redução da resistividade elétrica da estrutura. Como a região onde foram realizados os ensaios é submersa, a carbonatação é desprezível e é mais um fator que contribui para uma maior quantidade de poros na microestrutura do concreto, pois a carbonatação contribui para uma redução da quantidade de poros do concreto devido à colmatação dos mesmos por CaCO_3 . Ressalta-se que o teste de carbonatação realizado não se refere à mesma região onde foram realizados os ensaios de esclerometria e resistividade elétrica, pois o ensaio de carbonatação da parede CAP2 é referente a uma região acima do NA do esgoto e os demais ensaios são referentes à região submersa.

Não foram encontrados sinais de erosão na unidade de desarenador, talvez isso possa ser

atribuído à baixa velocidade na unidade que foi prevista em projeto ser de 0,3 m/s e que foi confirmada por meio de medição com a sonda eletromagnética, outro motivo pode ser também a proteção superficial utilizada nesta unidade que agora está se deteriorando, mas que contribuiu para evitar o atrito da areia diretamente com o concreto durante a remoção desses sólidos do efluente.

Uma outra particularidade das caixas de areia se refere à aplicação do coagulante próximo às paredes vertedoras ao canal da calha Parshall. Assim, conforme mencionado no Capítulo 3, optou-se por investigar a contaminação do concreto por cloreto por meio da aspersão de Nitrato de Prata. Como a análise dos resultados da aspersão do Nitrato de Prata foi prejudicada pela frente de carbonatação do concreto, optou-se por realizar a investigação da microestrutura dos corpos de prova extraídos na parede CAP2 por meio da utilização de Microscópio Eletrônico de Varredura. A amostra 1.1 é proveniente do corpo de prova 1 na região superficial carbonatada (Figura 4.47 a Figura 4.60) e a amostra 1.4 refere-se à extração há, aproximadamente, 4 cm da superfície da parede (Figura 4.61 a Figura 4.71).

Figura 4.46 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais da Caixa de Areia



Nas Figura 4.47 e Figura 4.48 são micrografias do concreto e mostra que nos poros desta amostra existe uma grande quantidade de etringita formada, isto porque como ela é um composto expansivo, é mais favorável sua formação no interior dos microporos do concreto onde há mais espaço disponível. Nas imagens geradas por Kim e Lee (2009) também foi verificou-se a formação da etringita nos poros do concreto.

Figura 4.47 – Poro preenchido com etringita na amostra 1.1 (região carbonatada) (x100)

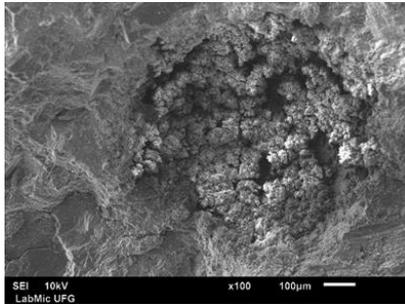
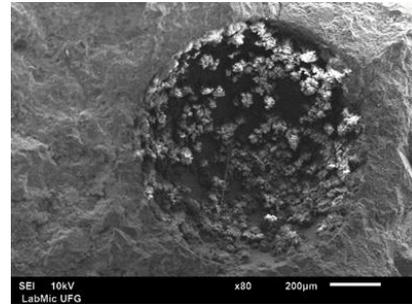


Figura 4.48 – Poro preenchido com etringita na amostra 1.1 (região carbonatada) (x80)



A Figura 4.49 apresenta uma imagem obtida dentro de um poro contendo material com a estrutura reticulada e acicular sugerindo a presença de etringita, presença essa confirmada pela análise de EDS (Figura 4.52) e também apresentada na Figura 4.51 que é uma imagem mais ampla do mesmo local. A Figura 4.50 mostra uma outra imagem na região carbonatada da amostra e a Figura 4.53 destaca os pontos da Figura 4.50 onde foi realizada análise por EDS (Figura 4.54 a Figura 4.60) e verificou-se a presença de cloro em quatro dos sete pontos analisados. Nos trabalhos de Kim e Lee (2009) e de Hoppe Filho *et al.* (2014) não foram indicadas a presença de cloro e como o cloro não está incluído entre os elementos químicos que constituem o concreto, conclui-se que há contaminação do concreto por cloretos.

Figura 4.49- Etringita na amostra 1.1 (região carbonatada) (x 1.500)

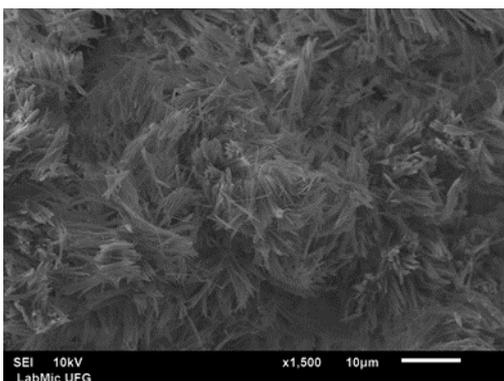


Figura 4.50 –Imagem MEV da amostra 1.1 (região carbonatada) (x 5.000)

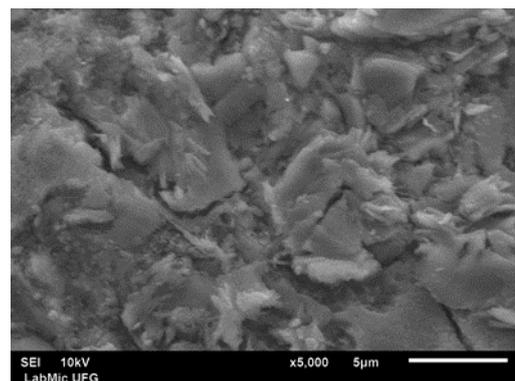


Figura 4.51 – Imagem no interior de um poro com realização de EDS localizado na amostra 1.1 (região carbonatada)

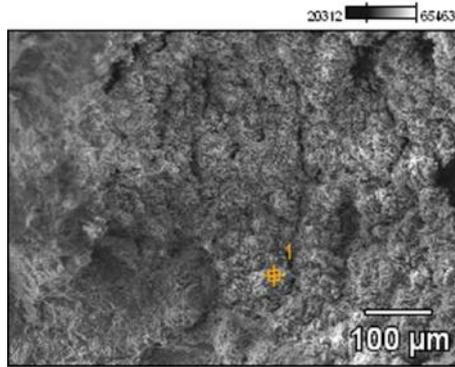


Figura 4.52 – EDS do ponto 1 apresentado na Figura 4.51

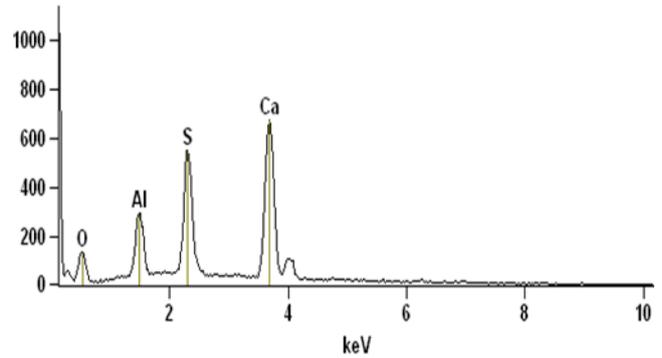


Figura 4.53 – Imagem da Figura 4.50 com pontos onde foram realizadas análise de EDS na amostra 1.1 (região carbonatada)

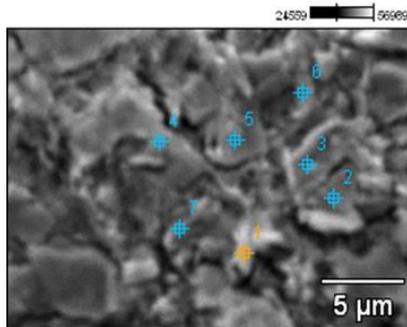


Figura 4.54 – Análise EDS Ponto 1 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada)

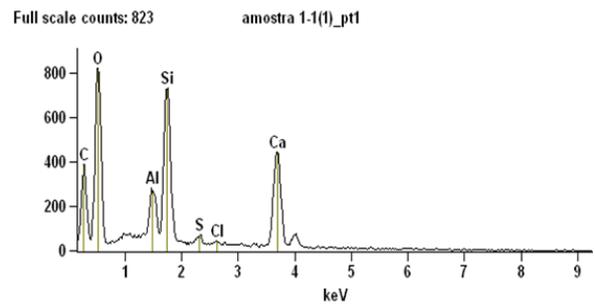


Figura 4.55 – Análise EDS Ponto 2 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada)

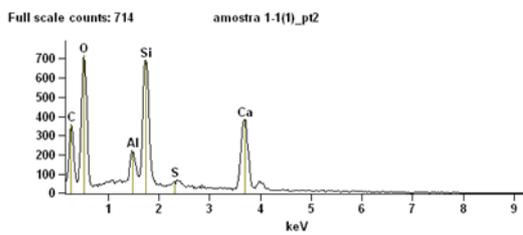


Figura 4.56 – Análise EDS Ponto 3 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada)

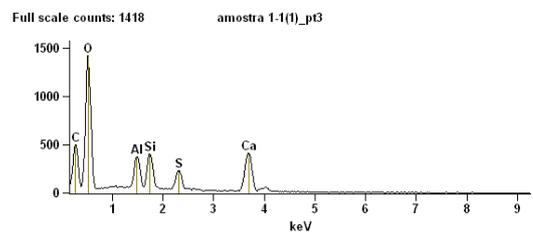


Figura 4.57 – Análise EDS Ponto 4 da Figura 4.50
(Amostra 1.1 – região carbonatada)

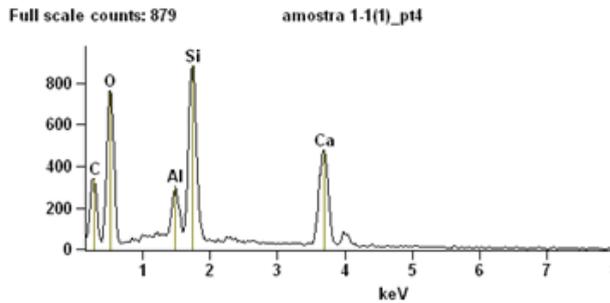


Figura 4.58 – Análise EDS Ponto 5 da Figura 4.50
(Amostra 1.1 – região carbonatada)

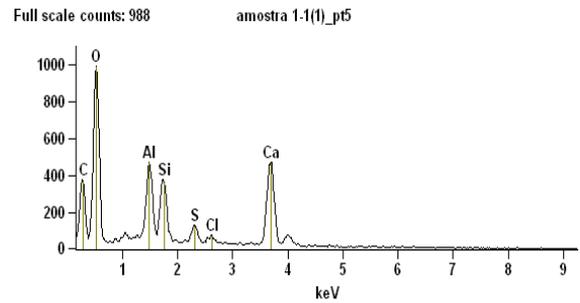


Figura 4.59 – Análise EDS Ponto 6 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada)

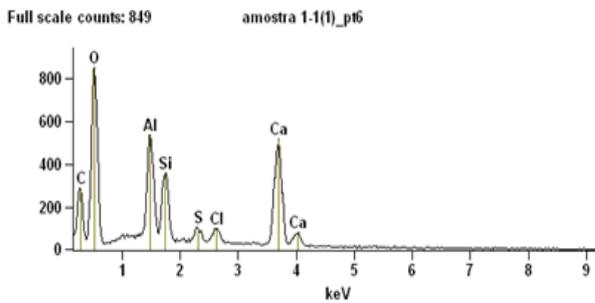
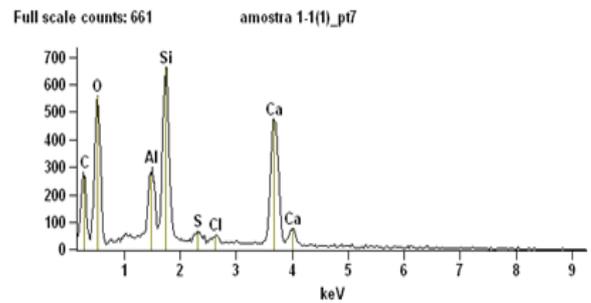


Figura 4.60 – Análise EDS Ponto 7 da Figura 4.50 (Amostra 1.1 – região carbonatada)



As Figura 4.61 a Figura 4.70 são referentes à amostra 1.4, de região mais interna da parede de concreto e ainda não carbonatada.

Figura 4.61 – Poro da amostra 1.4 sem presença expressiva de etringita (região não carbonatada) (x 70)

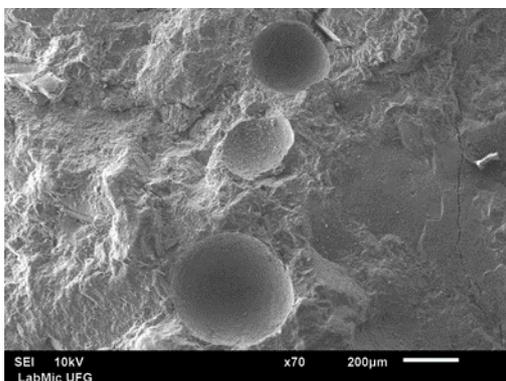


Figura 4.62 – Imagem ampliada do poro da amostra 1.4 (região não carbonatada) (x 2.000)

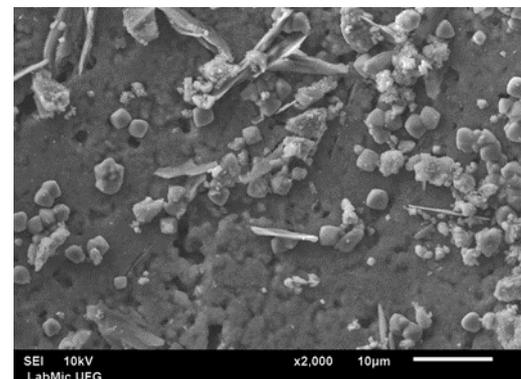


Figura 4.63 – Imagens da amostra 1.4 (região não carbonatada) (x 5.000)

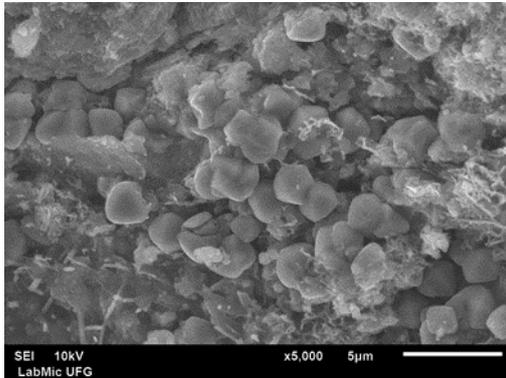
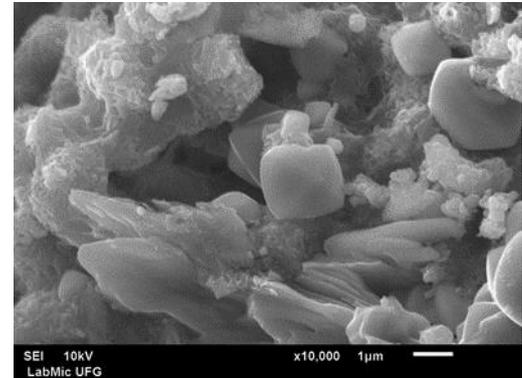


Figura 4.64 – Imagem da amostra 1.4 (região não carbonatada) (x 10.000)



Percebe-se que nesta amostra, o preenchimento dos poros por etringita apresentou uma concentração bem inferior à amostra 1.1, o que é esperado uma vez que o ataque por sulfatos ocorrerá primeiramente na superfície e as camadas mais profundas estão mais protegidas com relação ao contato com o esgoto o que reforça a importância do cobrimento na proteção das armaduras.

Figura 4.65 – Imagem da Figura 4.62 com pontos onde foram realizadas análise de EDS Amostra 1.4 (região não carbonatada)

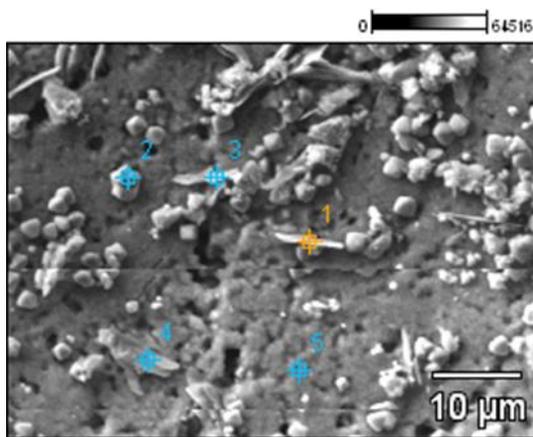


Figura 4.67 – Análise EDS Ponto 2 da Figura 4.65 (região não carbonatada)

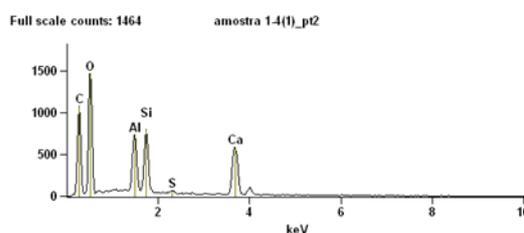


Figura 4.66 – Análise EDS Ponto 1 da Figura 4.65 (Amostra 1.4 – região não carbonatada)

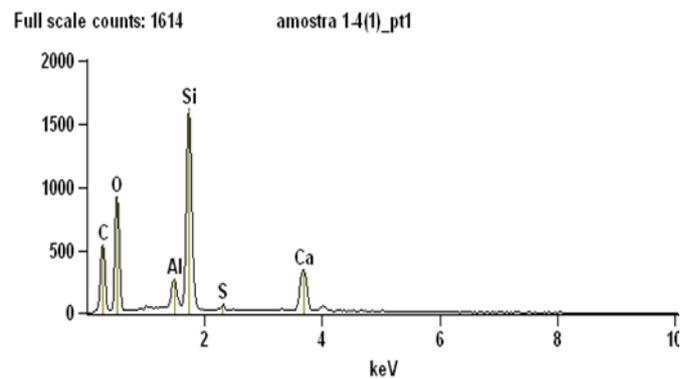


Figura 4.68 – Análise EDS Ponto 3 da Figura 4.65 (região não carbonatada)

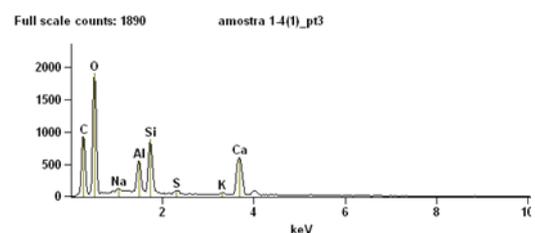


Figura 4.69 – Análise EDS Ponto 4 da Figura 4.65
(região não carbonatada)

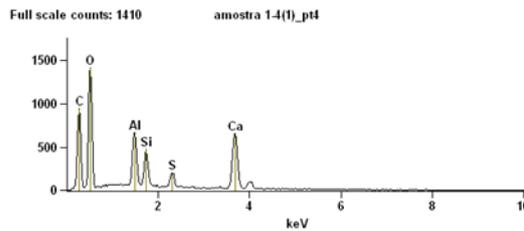
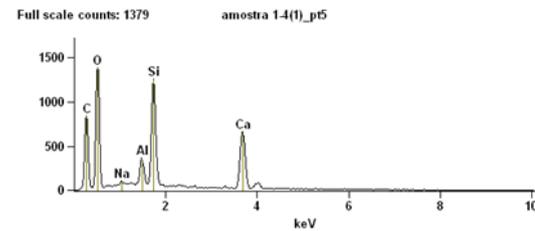


Figura 4.70 – Análise EDS Ponto 5 da Figura 4.65
(região não carbonatada)

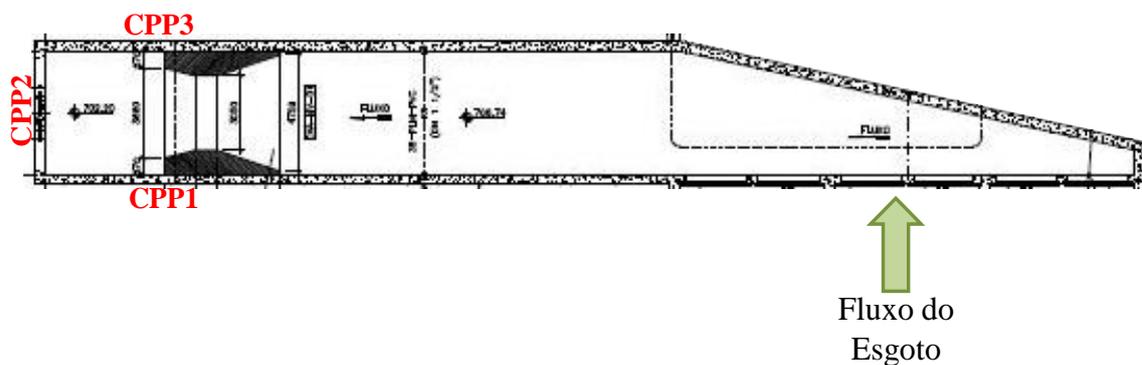


Outra constatação nessa amostra está evidenciada nas Figura 4.65 Figura 4.70 onde foi realizado o EDS. A Figura 4.65 mostra os pontos escolhidos dentro de um poro da amostra 1.4 e as Figura 4.66 a Figura 4.70 mostram os resultados da análise de EDS. Observa-se que em nenhum dos pontos analisados indicou a presença de cloro, o que reforça mais ainda que o cloro encontrado na amostra 1.1 é proveniente do coagulante Cloreto Férrico utilizado no tratamento do efluente.

4.3.7 Calha Parshall

A Calha Parshall está à jusante da Caixa de Areia e é representada na Figura 4.71.

Figura 4.71 – Croqui da Calha Parshall com elementos estruturais

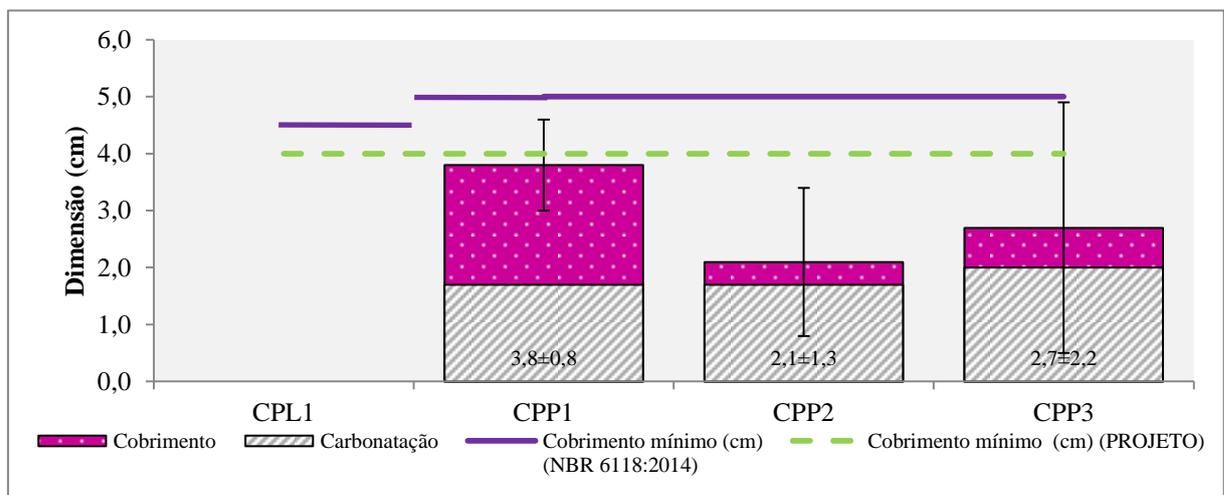


A Calha Parshall numa estação de tratamento tem a função de provocar a mistura rápida do coagulante com o efluente e medir sua vazão, sendo que a primeira é a mais importante para a ETE H uma vez que a vazão é medida eletronicamente. Desta forma, a Calha Parshall provoca o turbilhonamento do esgoto para garantir a mistura dos produtos químicos. Embora haja turbulência nesta unidade, não foram encontrados indícios de corrosão nos elementos estruturais da unidade e a explicação para isto pode ser porque trata-se de uma unidade aberta, em que não há confinamento e concentração de gases e, portanto, a agressividade é um pouco

menor; isto também pode ser comprovado com os resultados apresentados na Tabela 4.2 sobre a presença de gás sulfeto nos arredores da unidade.

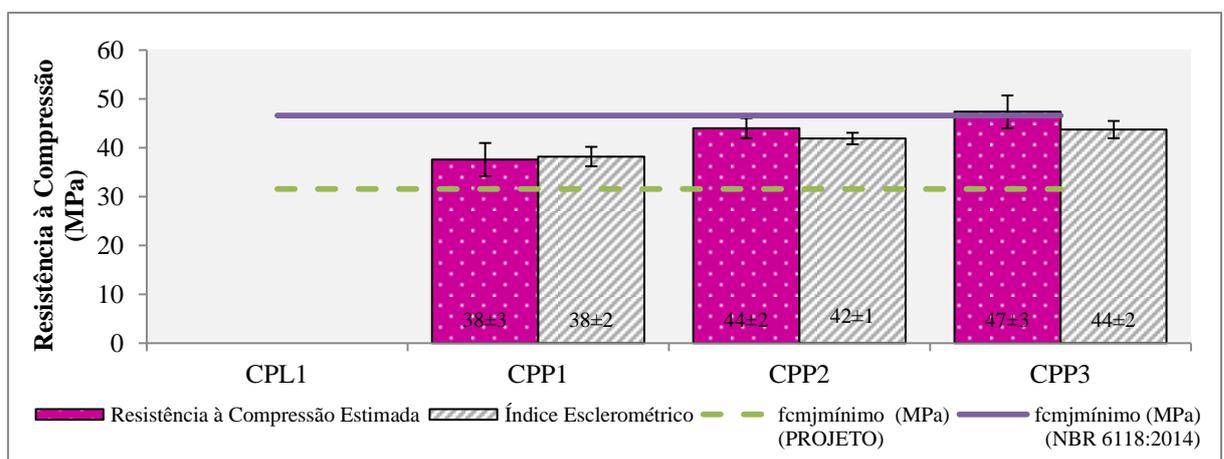
Na Figura 4.72, a frente de carbonatação apresentou-se de forma uniforme em todas as unidades, entretanto, percebe-se que o cobrimento está bastante prejudicado, o que implica numa falha do controle de qualidade da execução da estrutura e, conseqüentemente, num aspecto favorável à uma degradação mais rápida da estação.

Figura 4.72 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais da Calha Parshall



A resistência à compressão apresentou valores que atendem às prescrições de projeto, sendo que o atendimento às prescrições da NBR 6118 (2014) coube somente à parede CPP3 (Figura 4.73).

Figura 4.73 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais da Calha Parshall



Na Calha Parshall também foi realizada a medição da velocidade do efluente por meio de sonda eletromagnética e constatou-se uma velocidade de 1,5 m/s, porém os sinais de erosão são muito pequenos ainda. Isso pode ser imputado à menor concentração de areia no efluente após a remoção desses sólidos na caixa de areia.

4.3.8 Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários

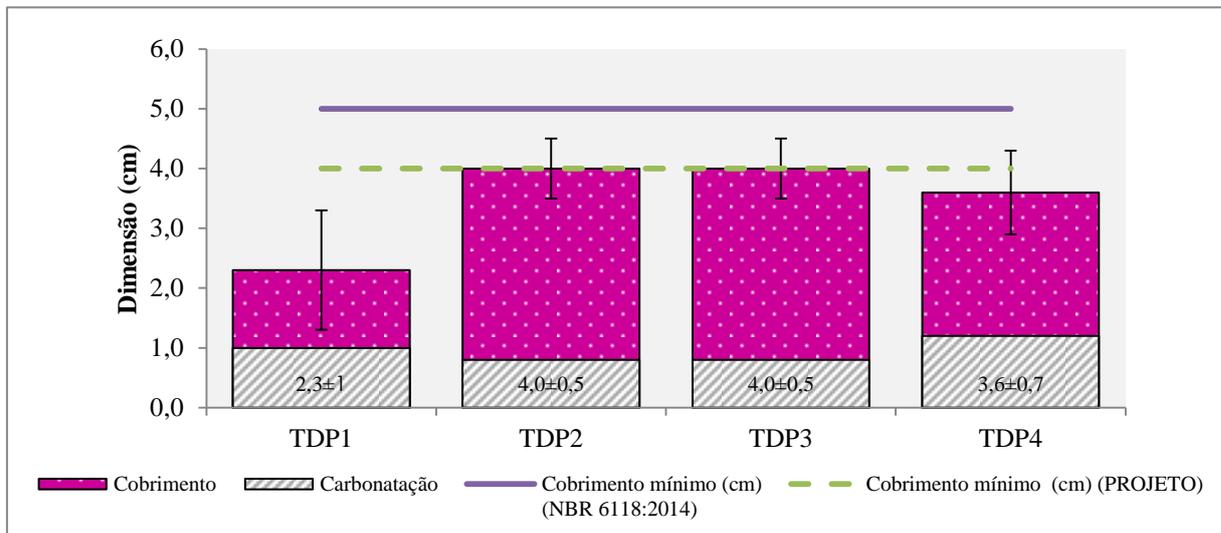
O Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários possui uma configuração extremamente simples e nele não ocorre nenhum processo de tratamento, pois funcionam como caixas de passagem para divisão do efluente entre os decantadores primários que estiverem em operação, portanto, não há particularidades a serem apontadas. A Figura 4.74 apresenta a unidade de tratamento.

Figura 4.74 – Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários e croqui com elementos estruturais



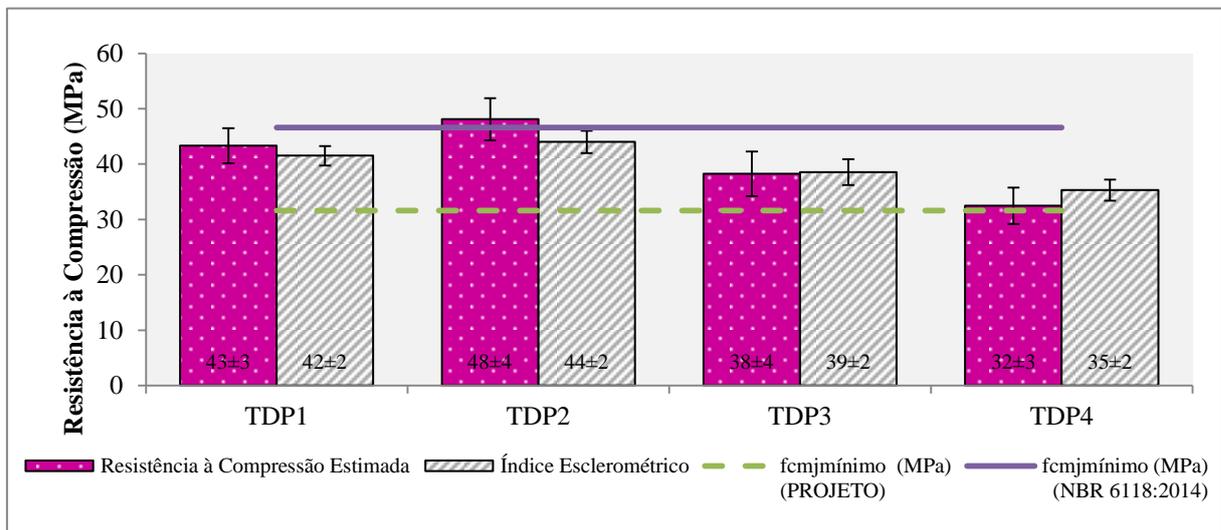
A Figura 4.75 mostra os resultados de carbonatação e cobrimento da unidade. A carbonatação foi relativamente baixa e uniforme e os cobrimentos, com exceção da parede TDP1, apresentaram-se dentro do padrão definido em projeto.

Figura 4.75 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários



O índice esclerométrico e a resistência à compressão estimada são apresentados na Figura 4.76.

Figura 4.76 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Distribuição aos Decantadores Primários



Da mesma forma que a Calha Parshall, esta unidade apresentou um bom parâmetro de durabilidade com relação à resistência à compressão estimada, tendo conseguido alcançar em todos os seus elementos estruturais, os patamares estabelecidos pelo projeto e um dos elementos estruturais atendendo à NBR 6118 (2014).

4.3.9 Decantadores Primários

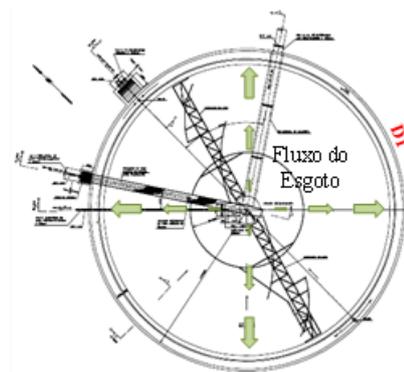
A ETE possui três decantadores primários com 42 m de diâmetro cada que funcionam em paralelo. Estas unidades são responsáveis por remover sólidos suspensos e matéria orgânica, esta última em menor quantidade, por meio da sedimentação dos flocos formados na coagulação. De maneira geral, o processo de tratamento que acontece nessa unidade não apresenta alta agressividade ao concreto, se não devido à atmosfera ácida típica de ambientes de estações de tratamento de esgoto. Devido ao grande monolitismo desta unidade operacional como uma cortina circular de concreto, adotou-se como um único elemento todo a estrutura do Decantador. Porém, existe um canal de coleta do esgoto decantado que somente no Decantador 3 pôde ser avaliado estruturalmente por estar vazio durante o período de inspeção realizado e, assim, os resultados dos ensaios apresentados neste canal são apresentados.

As Figura 4.77 e Figura 4.78 ilustram imagens da estação e a configuração em planta dos decantadores.

Figura 4.77 - Decantador da ETE H



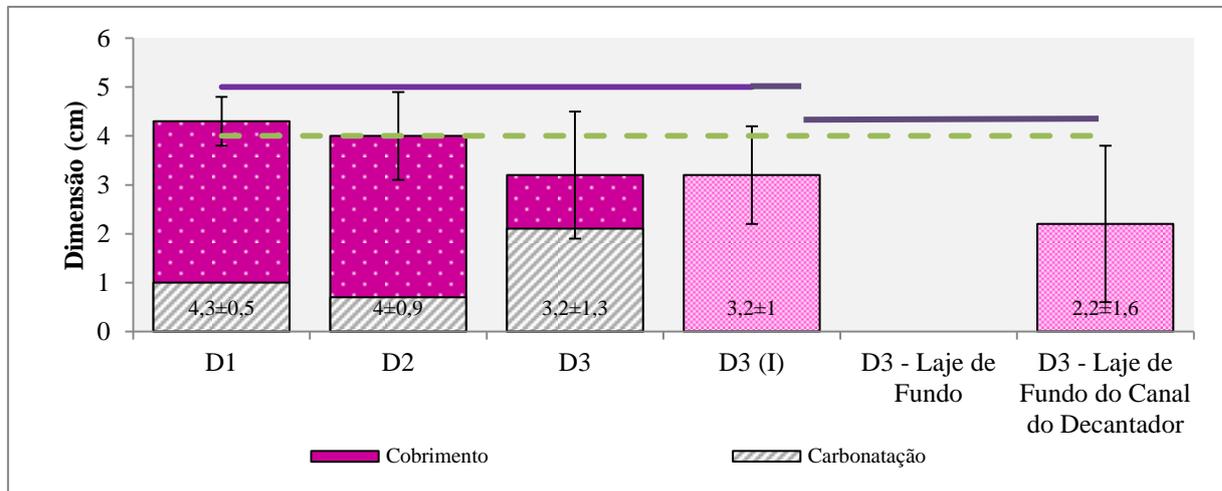
Figura 4.78 – Croqui padrão dos Decantadores com elementos estruturais



A Figura 4.79 mostra os resultados obtidos para os três decantadores. O cobrimento dos Decantadores 1 e 2 estão atendendo adequadamente à proposta apresentada no projeto e possuem cobrimentos relativamente baixos. Contudo, o Decantador 3 além de apresentar o menor cobrimento e não atender aos parâmetros de projeto, foi ainda o que apresentou a maior frente de carbonatação o que pode implicar numa degradação mais acelerada nessa unidade de tratamento. Nota-se que internamente no Decantador 3, o cobrimento da parede (D3 (I)) e a laje de fundo do canal do decantador apresentam praticamente o mesmo

cobrimento que a face externa e menor que a definição de projeto.

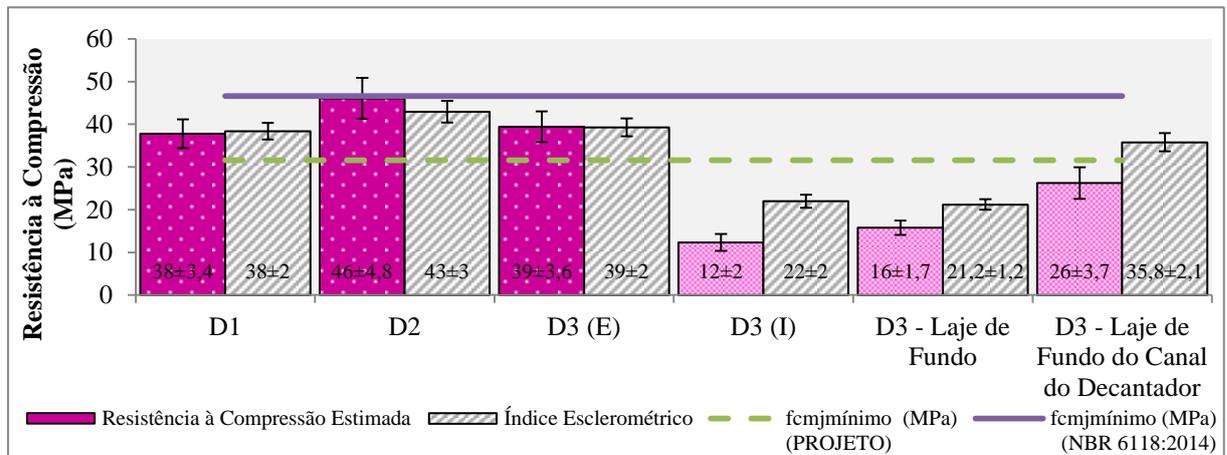
Figura 4.79 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais dos Decantadores D1, D2 e D3



Com relação à resistência à compressão, a Figura 4.80 mostra que foi um parâmetro que praticamente atendeu às prescrições de projeto. Todavia, internamente no Decantador 3, a medida da resistência superficial mostrou uma redução considerável, o que é preocupante adotando-se o raciocínio de que o enfraquecimento da superfície, primeira proteção física do concreto, é primordial para contribuir com uma maior durabilidade da estrutura e que ainda há uma deficiência de cobrimento, o que pode incorrer numa degradação mais acelerada.

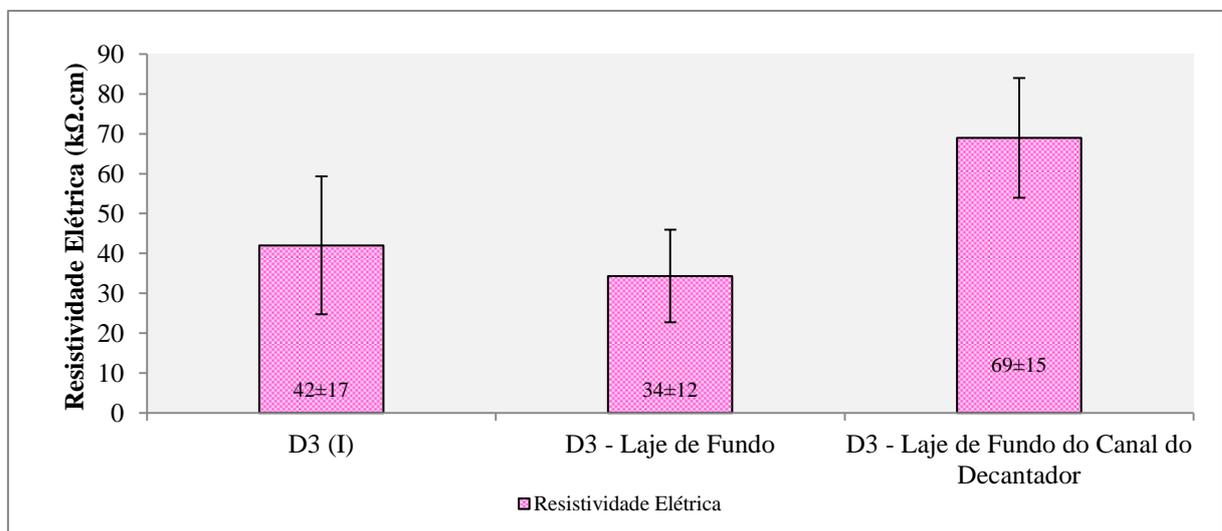
No Decantador 3, embora tenha sido possível acessar internamente a unidade, não foi realizado o ensaio de carbonatação na área interna do decantador, primeiro porque no momento da realização do ensaio de carbonatação em todas as unidades, o decantador estava cheio de efluente, sendo esvaziado somente num momento posterior, quando já não tínhamos disponíveis o marteleto para fratura e realização do ensaio e segundo porque se trata de uma unidade que permanece a maior parte do tempo com água em seu interior, o que dificulta o acesso de gases e a acidificação do concreto e, assim, como verificado na caixa de areia, a espessura acidificada do concreto é praticamente desprezível.

Figura 4.80 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais dos Decantadores D1, D2 e D3



A Figura 4.81 mostra os resultados do ensaio de resistividade elétrica realizado internamente no Decantador 3 (este foi o único acessível internamente). A resistividade obtida foi baixa e foram diagnosticados alguns sinais de uma possível corrosão das armaduras nas regiões analisadas, como mostram a Figura 4.82, Figura 4.83 e Figura 4.84.

Figura 4.81 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Decantador D3



Houve ainda um ponto específico, em região em que existia uma infiltração detectada na parede lateral do desarenador, que apresentou resistividade de 15 kΩ.cm. A infiltração está ilustrada na Figura 4.84.

Figura 4.82 – Pontos com produtos de corrosão



Figura 4.83 – Ponto de Umidade no Decantador 3



Figura 4.84 – Ponto de Infiltração no Decantador 3



4.3.10 Tanque de Efluente Primário (Final)

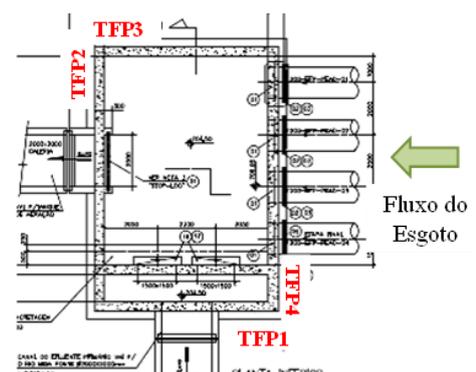
O tanque de efluente final possui como função atualmente reunir o efluente tratado nos decantadores primários e encaminhá-lo para o ponto de lançamento no corpo receptor. Futuramente, ele reunirá o efluente dos decantadores primários e encaminhará para o Tanque de Aeração a ser construído, por isso o termo final, atualmente, e primário para quando for implantada a segunda etapa da estação. As Figura 4.85 e Figura 4.86 apresentam as características desta unidade.

Figura 4.85 – Tanque de Efluente Final da ETE H



Fluxo de Esgoto

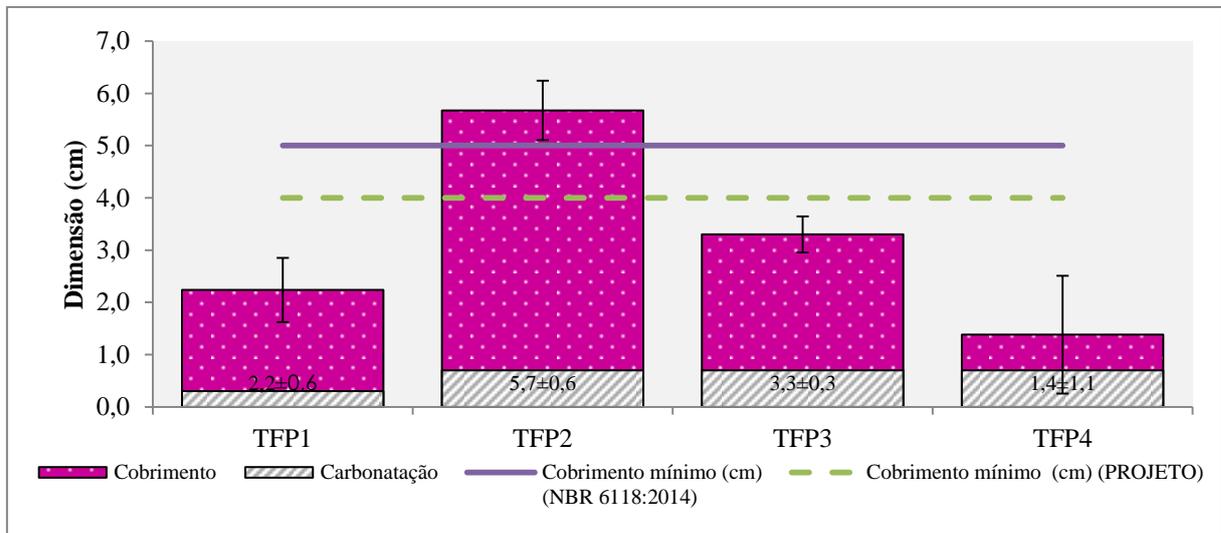
Figura 4.86 - Croqui do Tanque de Efluente Final da ETE H com elementos estruturais



Fluxo do Esgoto

A Figura 4.87 apresenta os resultados obtidos para os ensaios de carbonatação e cobrimento no Tanque de Efluente Final. Embora os resultados para o cobrimento não tenham conseguido apresentar o que foi definido em projeto, a carbonatação nesta unidade foi bastante baixa o que favorece a manutenção da passividade da armadura. Entretanto, observa-se pelos valores baixos e de alta variabilidade do cobrimento que houve falhas na gestão da qualidade do processo construtivo.

Figura 4.87 – Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Efluente Final



A resistência à compressão estimada (Figura 4.88) apresentou bons resultados tendo atingido os valores especificados em projeto e ainda aos próprios valores da norma em vigência atualmente, com exceção da parede TFP3. Desta forma, acredita-se que esta unidade apresenta um bom indicador com relação à durabilidade. Além de apresentar uma boa perspectiva com relação à resistência, essa unidade também apresentou altos valores de resistividade elétrica do concreto (Figura 4.89) e não foram identificados sinais de corrosão nesta unidade.

Figura 4.88- Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Efluente Final

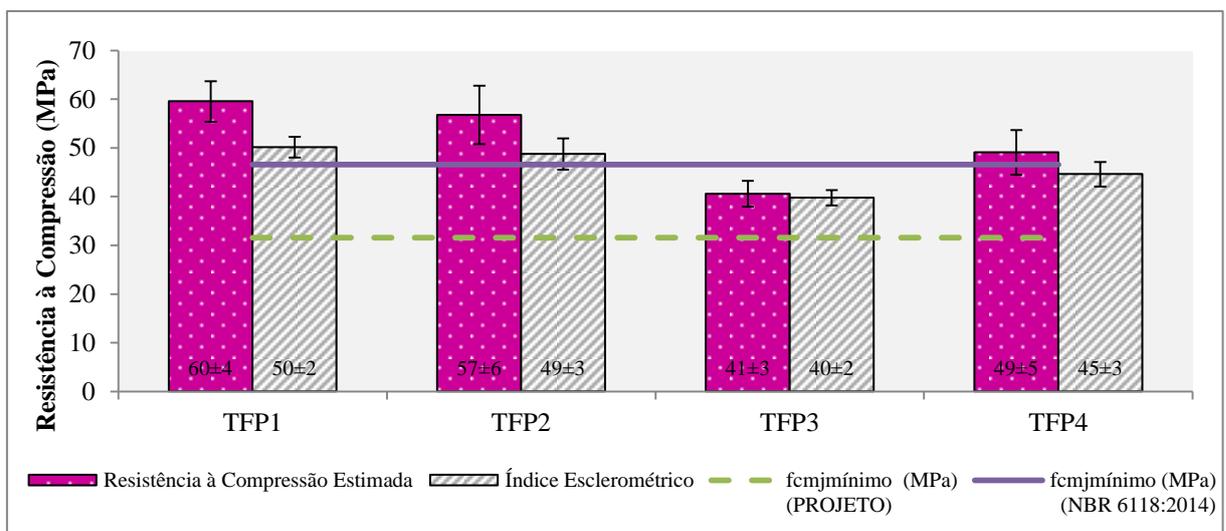
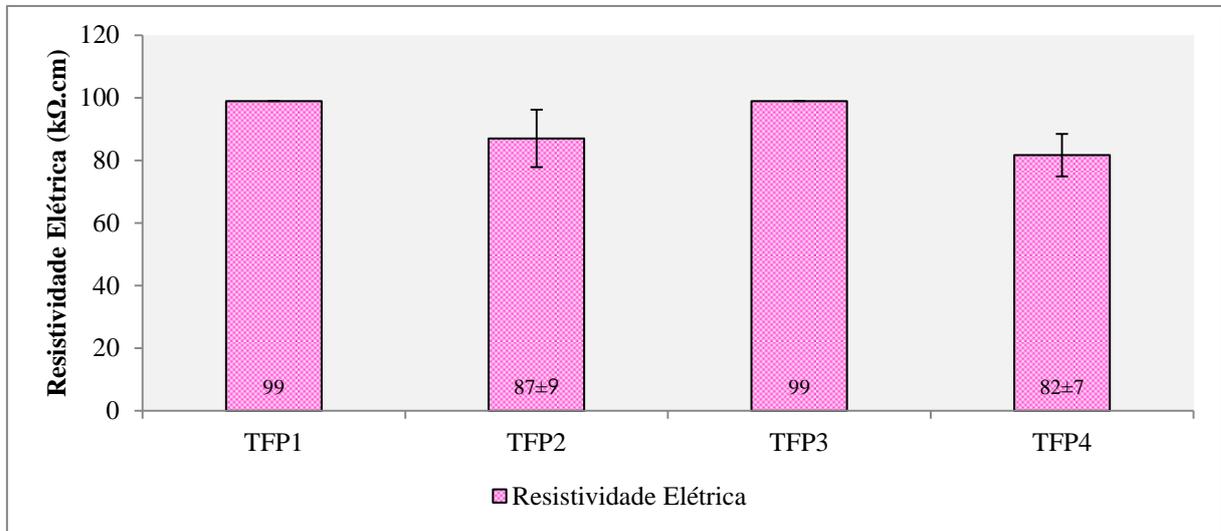


Figura 4.89 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Tanque de Efluente Final



De uma maneira geral, esta unidade se mostrou bastante conservada, não apresentando grandes sinais de deterioração.

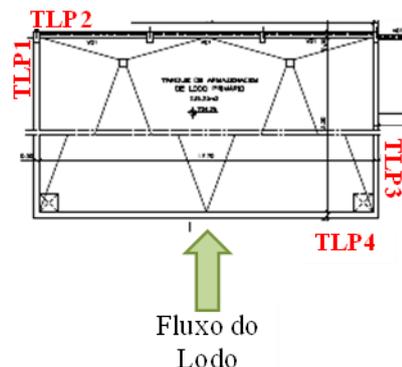
4.3.11 Tanque de Armazenagem de Lodo

Os sólidos removidos nos decantadores primários são encaminhados para o Tanque de Armazenagem de Lodo (TL). Esses sólidos ficam armazenados até serem bombeados para a centrífuga para remoção de líquido e, posteriormente, para áreas de recuperação ambiental, onde é corretamente depositado e monitorado para que não provoque danos ambientais. A Figura 4.90 mostra a unidade de tratamento e a Figura 4.91 sua configuração em planta.

Figura 4.90 – Tanque de Armazenagem de Lodo da ETE H



Figura 4.91 – Croqui do Tanque de Armazenagem de Lodo com elementos estruturais



Nessa unidade de tratamento, há uma iniciação à anaerobiose, porém não foi possível verificar

seu tempo de detenção, mas pela deterioração da estrutura, a produção de sulfetos em seu interior é alta, a medida de sulfetos nesta unidade ocorreu somente externamente. Consta-se nesta unidade que somente a parede TLP3 ultrapassou a espessura de cobrimento recomendada por projeto, sendo que a TLP1 e a TLP3 apresentaram valores próximos e a TLP4 apresentou valor muito baixo se comparado ao que deveria ter sido executado. A frente carbonatada está em estágio avançado nos elementos TLP2, TLP3 e TLP4. Desta forma, a durabilidade desta estrutura pode estar comprometida, em parte por motivo de uma execução fora dos bons padrões estabelecidos.

Observou-se ainda que a laje apresenta uma grande espessura que contempla o sistema de impermeabilização (Figura 4.93), portanto, assim como nas lajes inspecionadas anteriormente, não foi possível determinar o cobrimento médio da armadura. Nessa laje, foi possível observar ainda que a armadura da borda na face inferior já se encontra em estágio avançado de degradação.

Figura 4.92 - Espessura carbonatada e de cobrimento medidos nos elementos estruturais do Tanque de Armazenagem de Lodo

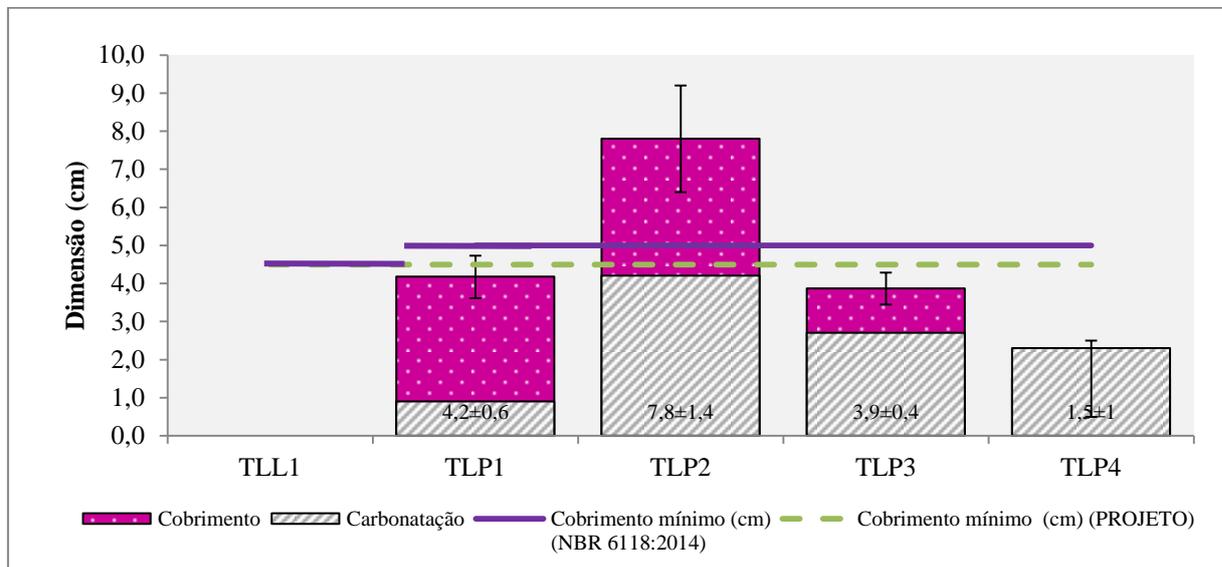
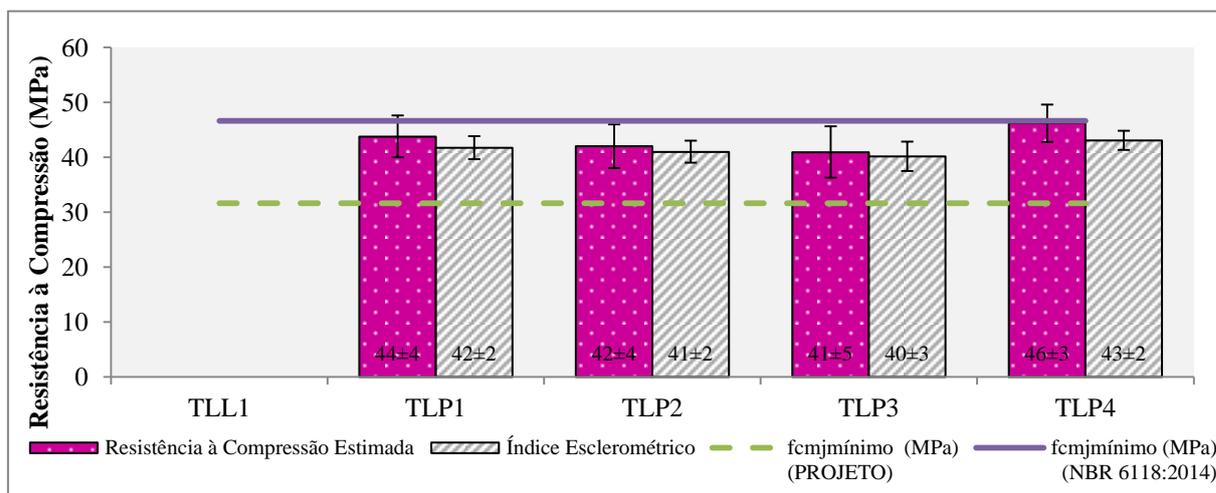


Figura 4.93– Laje do Tanque de Armazenagem de Lodo (atenção à espessura da camada de impermeabilização)



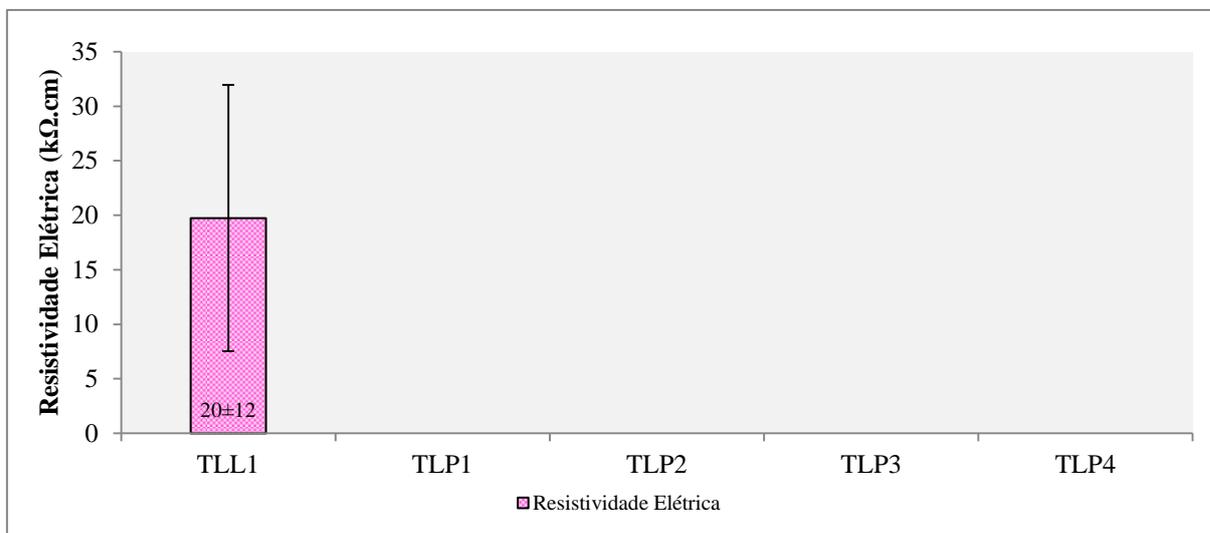
Os valores de resistência à compressão estimada de todos os elementos (Figura 4.94) atenderem a prescrição de projeto e somente um alcançou o patamar estipulado pela normativa em vigência.

Figura 4.94 – Índice esclerométrico e resistência à compressão estimada nos elementos estruturais do Tanque de Armazenagem de Lodo



A resistividade elétrica medida nos elementos estruturais desta unidade de tratamento é apresentada na Figura 4.95.

Figura 4.95 – Resistividade elétrica do concreto nas faces internas dos elementos estruturais do Tanque de Armazenagem de Lodo



A Figura 4.95 mostra somente o resultado da laje que foi medida internamente (na espessura da laje) e apresentou grande variabilidade e valores muito baixos.

Figura 4.96 – Face inferior da laje superior do tanque de armazenagem de lodo com corrosão



Observou-se nesta unidade muitos pontos de corrosão na face inferior da laje (Figura 4.96) e nas proximidades das aberturas da mesma (Figura 4.93), o que confirma a alta concentração de gases presente no local.

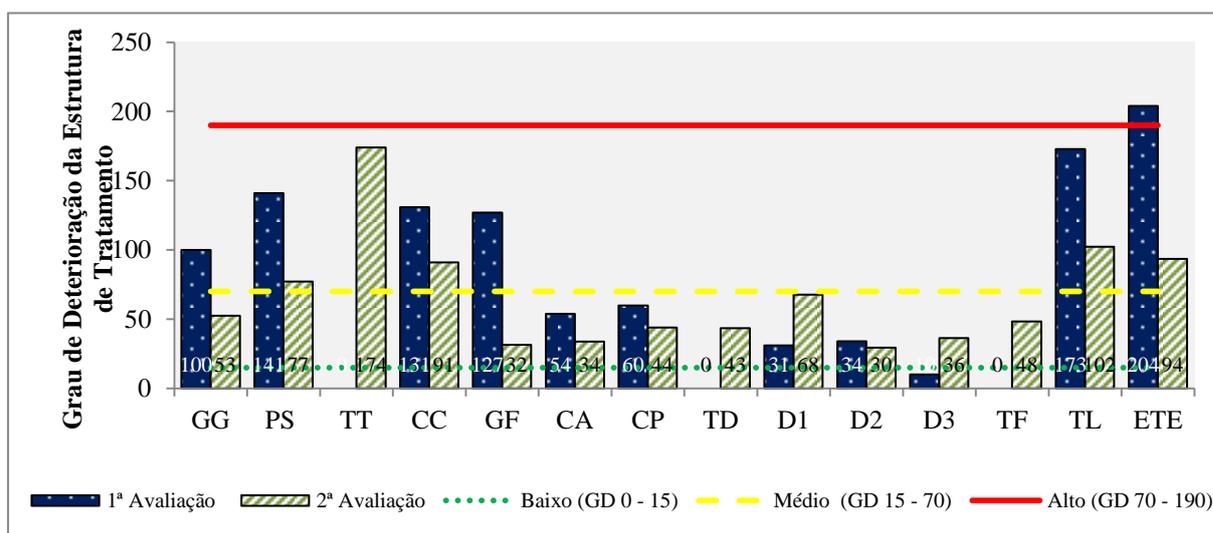
4.4 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA GDE/UnB

A primeira aplicação da metodologia na ETE H foi publicada por Dias, Carasek e Cascudo

(2017) e contou com algumas alterações nos fatores de ponderação da metodologia, assim os resultados obtidos permitiram visualizar que havia um superdimensionamento no grau de deterioração. Portanto, as alterações feitas foram canceladas e a avaliação refeita, desta feita com maior experiência da avaliadora e decidindo-se manter, o mais conservador possível, os parâmetros de ponderação propostos por Fonseca (2007), além ainda de contar com mais ensaios para subsidiar a aplicação dos fatores de intensidade.

A Figura 4.97 apresenta os resultados obtidos na primeira avaliação realizada por Dias, Carasek e Cascudo (2017) e os novos resultados obtidos mantendo-se quase que os mesmos parâmetros adotados por Fonseca (2007). Observa-se que embora o grau de deterioração das estruturas das unidades de tratamento tenha se reduzido, os que antes haviam sido os mais deteriorados continuaram com os maiores valores de Grau de Deterioração e os menos deteriorados também permaneceram com fatores de deterioração menores. Logo, a limitação informada na primeira aplicação da metodologia foi sanada mantendo-se o mesmo *ranking* de deterioração. Destaca-se que na primeira avaliação que o Tanque de Transição não foi avaliado. As Fichas de Avaliação de cada elemento estrutural estão disponíveis no Apêndice B desta dissertação.

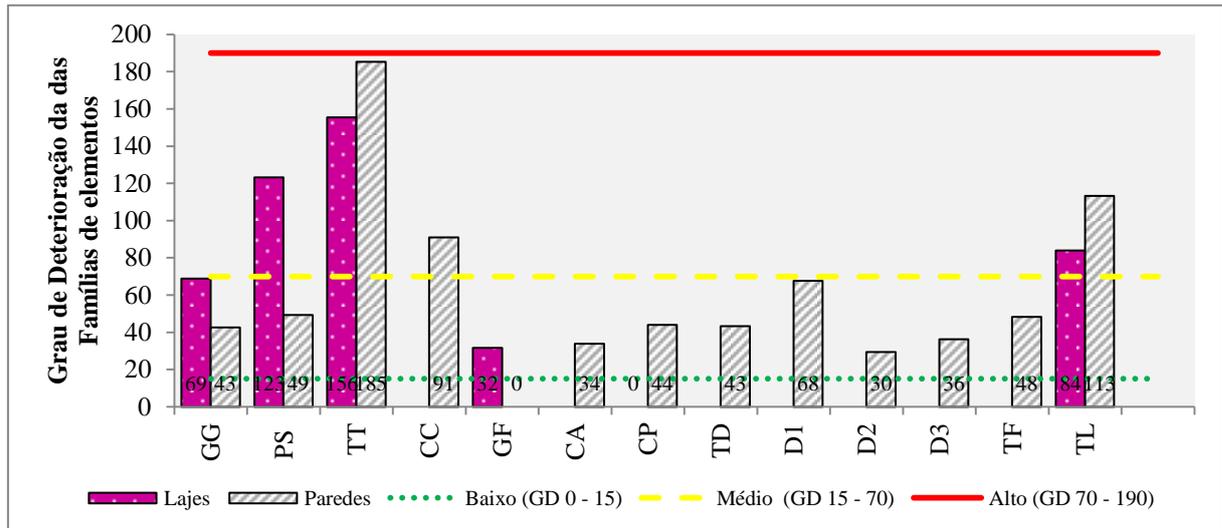
Figura 4.97 - GDE das Unidades de Tratamento 1ª e 2ª Avaliação



A Figura 4.98 apresenta os dados para os resultados de famílias de elementos por unidades de tratamento na segunda avaliação. Nota-se que as lajes na grade grossa e no poço manifestaram deterioração muito maior que as paredes dessas unidades apresentando comportamento parecido com o que ocorre nos tubos coletores de esgoto. A laje da grade fina teve sua avaliação um pouco prejudicada em decorrência de acesso à sua face inferior nas

proximidades com o canal de chegada, tendo sido avaliada somente pelas aberturas dos canais que conduziam para o desarenador. O maior grau de deterioração apareceu no tanque de transição, tanque este que apresentou alguns sérios problemas, conforme já discutido anteriormente.

Figura 4.98 - GD Família de Elementos



A ETE como um todo apresentou Grau de Deterioração Geral de 94, conforme apresentado na Figura 4.97, sendo então classificada de acordo com a nova faixa de classificação proposta como Nível de Deterioração Alto que recomenda intervenção em curto prazo, dentro de, no máximo, um ano. Entretanto, observa-se que a maior parte das unidades de tratamento dessa estação (69%) se encontra com nível de deterioração médio e necessitará de manutenção somente à longo prazo (em, no máximo, dois anos) e o restante (31%) precisa de manutenção dentro de 6 meses ou um ano.

Foram elaborados também gráficos que apresentassem o comportamento da intensidade das manifestações patológicas quanto ao Fator de Intensidade e sua ocorrência de forma geral na ETE. A Contaminação por Cloretos, Deslocamento por Empuxo, Desvios de Geometria e Flechas não foram verificadas, ou seja, apresentaram valores de F_i iguais a zero em todos os elementos e, por esse motivo, não estão aqui representadas graficamente.

A Figura 4.99 explica que a carbonatação ocorreu em 82% dos elementos estruturais, sendo que em 9% deles, ela apresentou fator de intensidade máximo o que mostra que a redução do pH do concreto já promoveu a desp passivação da armadura e ela encontra-se susceptível à corrosão.

A Figura 4.100 mostra que mais de 50% dos elementos não apresentaram o cobrimento prescrito em projeto e isto pode comprometer seriamente a durabilidade da estrutura. Trata-se ainda de um dano particularmente causado por falta de controle de qualidade durante a obra, uma vez que a espessura de cobrimento deve ser acompanhada de perto durante a concretagem para garantir maior durabilidade à estrutura.

Figura 4.99 - Carbonatação e Fatores de Intensidade

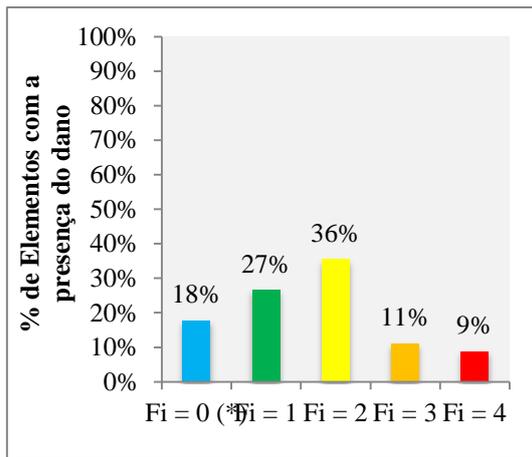
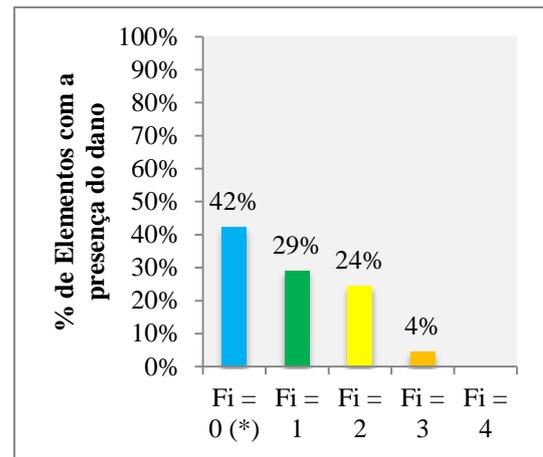


Figura 4.100 - Cobrimento e Fatores de Intensidade



O Fi indicado como zero possui um asterisco, pois pode ser tanto porque a manifestação patológica não existe, ou porque não foi pôde ser observada durante a avaliação.

A Figura 4.101 mostra que 80% dos elementos não apresentaram sinais de corrosão. Este é um bom indicador, uma vez que estando em um ambiente agressivo a corrosão das armaduras é uma das manifestações patológicas mais comuns nas ETEs. Entretanto, 2% dos elementos e mais precisamente as armaduras das lajes apresentam corrosão avançada e com perda de seção, principalmente nas bordas das aberturas que promovem a saída do gás sulfídrico. Desta forma, estas regiões precisam receber tratamento diferenciado do restante da unidade uma vez que é alta sua vulnerabilidade à corrosão.

A desagregação (Figura 4.102) que aparece nesta pesquisa trata-se mais precisamente da causada pela biodegradação (ataque químico por acidez provocada por microrganismos). Esta manifestação apareceu em 40% das unidades, possuindo um fator de intensidade elevado em apenas 4%. Esses locais mais deteriorados por desagregação poderiam receber um revestimento de superfície para amenizar os efeitos nocivos do gás ao concreto.

Figura 4.101 - Corrosão das Armaduras e Fatores de Intensidade

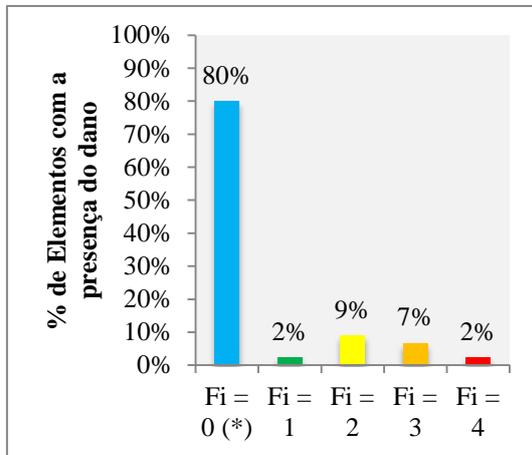
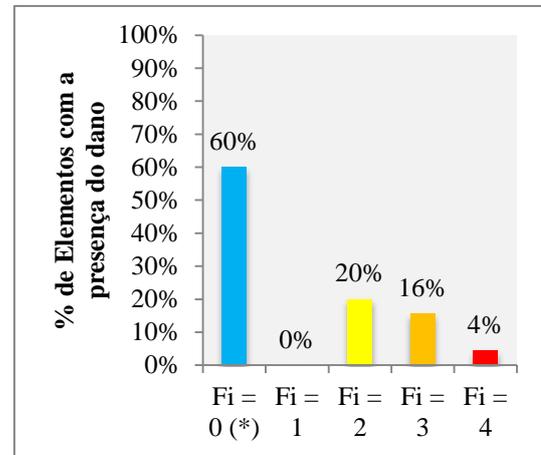


Figura 4.102 - Desagregação e Fatores de Intensidade



A Figura 4.103 mostra a manifestação patológica eflorescência. Esta manifestação pode ser causada por falhas na impermeabilização ou no controle de qualidade durante a execução de juntas de concretagem em que não são tomados os devidos cuidados. O percentual de aparecimento nos elementos é relativamente baixo, entretanto em 7% dos elementos ela apareceu com grandes manchas acentuadas e em grandes extensões.

As Falhas de Concretagem estão apresentas na Figura 4.104. Houve um baixo percentual de aparecimento desta manifestação e ele ainda apresentou baixo fator de intensidade. Isso mostra que nesse quesito a execução da obra conseguiu atender às boas práticas da construção.

Figura 4.103 - Eflorescências e Fatores de Intensidade

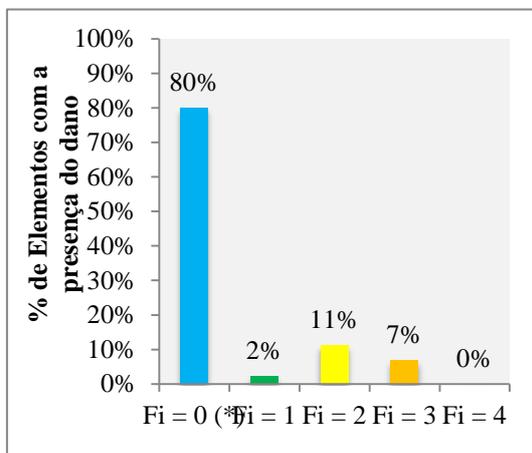
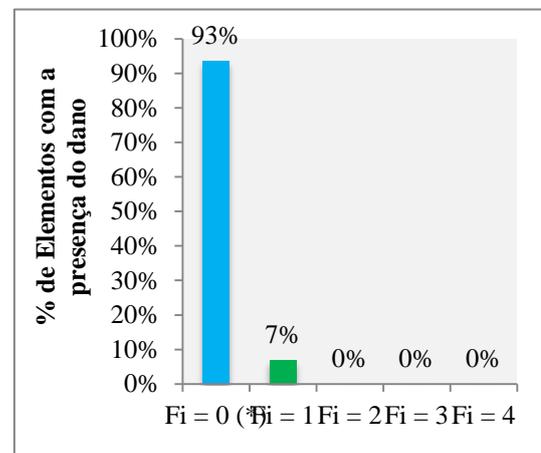


Figura 4.104 - Falhas de Concretagem e Fatores de Intensidade



As fissuras aparecem geralmente acompanhadas das eflorescências, desde que exista uma

pressão de hidrostática, ainda que baixa. As fissuras sempre aparecerão nas estruturas de concreto, e o mais importante não é seu aparecimento e sim suas causas, assim é importante investigar as causas das fissuras e adotar as medidas necessárias para tamponá-las, pois nesse ambiente agressivo que as ETEs possuem, fissuras são pontos vulneráveis que podem provocar o início de corrosão da armadura, uma vez que permitem o ingresso de gases ácidos na microestrutura do concreto. Na Figura 4.105 está apresentado o percentual de aparecimento de fissuras que incidiu sobre 49% dos elementos estruturais.

Os deslocamentos estão relacionados nesta pesquisa ao fenômeno da corrosão das armaduras. A Figura 4.106 mostra que em 2% dos elementos houve lascamento acentuado com perda relevante de seção.

O dano Manchas é intrínseco à operação das ETEs, pois as manchas são causadas por microrganismos que encontram nas paredes dos elementos, um microclima altamente favorável ao seu desenvolvimento: nutrientes, umidade e substrato. Desta forma, principalmente na linha do efluente, há o aparecimento de manchas com fator de intensidade mais elevado. A Figura 4.107 mostra que 31% dos elementos estruturais apresentaram manchas escuras em grandes extensões nas unidades de tratamento.

Figura 4.105 - Fissuras e Fatores de Intensidade

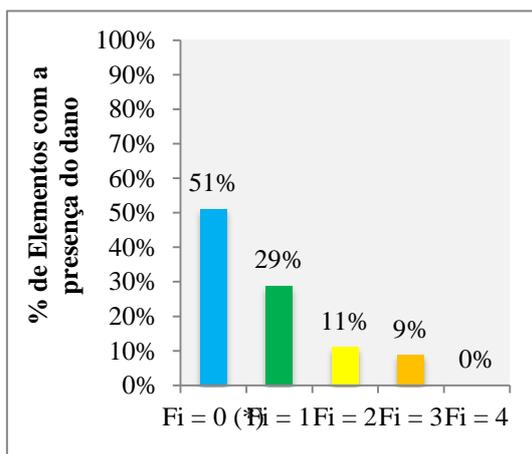
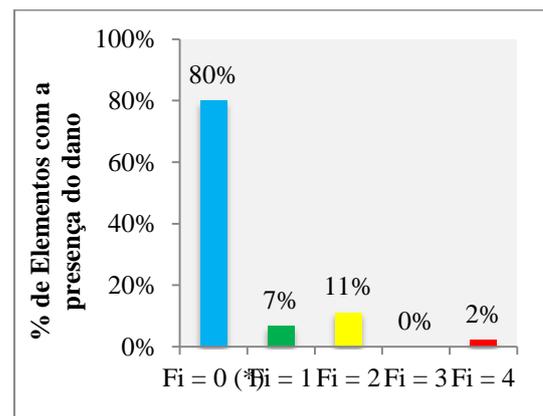


Figura 4.106 - Deslocamento e Fatores de Intensidade



O dano sinais de esmagamento apareceu somente no elemento estrutural TTP3 (Figura 4.108). Esta unidade como um todo necessita de acompanhamento e monitoramento de perto de todas as suas manifestações patológicas, pois foi a unidade de tratamento com maior grau de deterioração.

Figura 4.107 - Manchas e Fatores de Intensidade

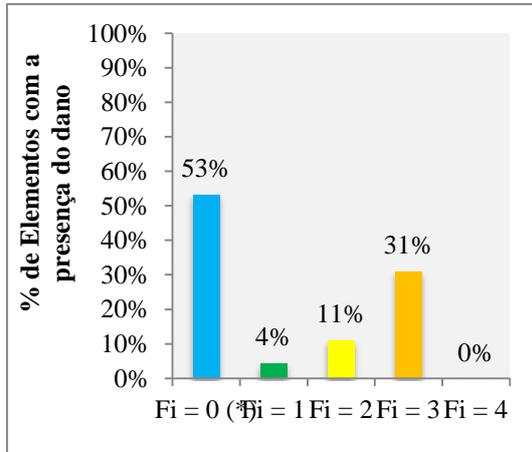
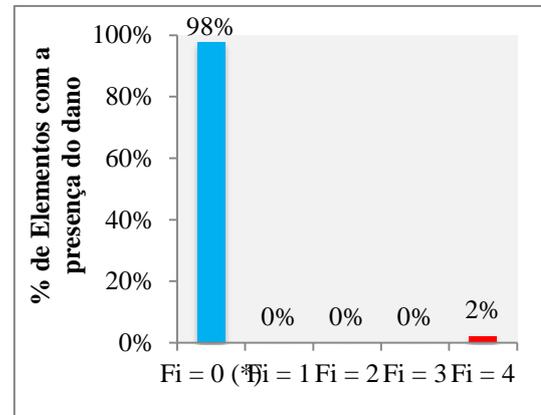


Figura 4.108 - Sinais de Esmagamento e Fatores de Intensidade



A umidade e a erosão são manifestações típicas de obras hidráulicas. A umidade pode ser provocada por fissuras ou alta porosidade do concreto e deve ser acompanhada de perto, pois é uma das grandes propulsoras do início do fenômeno de corrosão, funcionando como eletrólito da pilha eletroquímica. Desta forma, é extremamente importante tomar cuidados durante a execução da obra para que ela não venha a compor o quadro de manifestação patológica das estruturas. A Figura 4.109 mostra que apenas em 22% dos elementos estruturais não apresentaram, ou não foi identificada, a ocorrência desta manifestação.

A manifestação erosão (Figura 4.110) aparece com maior intensidade nas unidades primárias com velocidade de fluxo mais acentuada sendo que ocorreu no canal que conduz ao desarenador com fator de intensidade 2 e na calha Parshall, de forma menos intensa com $F_i = 1$.

Figura 4.109 - Umidade e Fatores de Intensidade

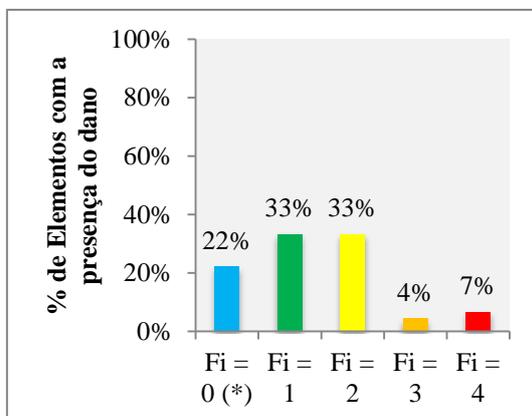
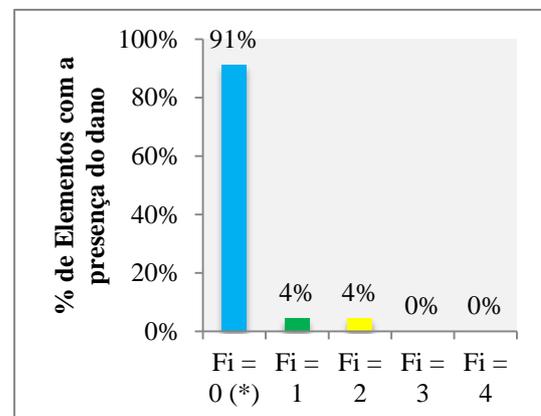


Figura 4.110 - Erosão e Fatores de Intensidade



A erosão pode ser prevenida com o tratamento cristalizante de superfícies ou outros impermeabilizantes que impeçam o atrito direto entre a areia e as paredes laterais das unidades de tratamento.

Finalizando esta extensa pesquisa, com o entendimento sobre as características dos esgotos e processos de tratamento, é possível correlacionar as prováveis manifestações patológicas com as unidades de tratamento, com base nesta experiência de avaliação e em todo o referencial teórico. A Tabela 4.3 correlaciona as unidades de tratamento e seus processos com as potenciais manifestações patológicas que podem ocorrer nas infraestruturas de concreto de ETEs.

Tabela 4.3 - Tipos de tratamento e relação com a deterioração do concreto

Unidades de Tratamento	Degradação típica
Unidade de Transporte	
Elevatórias (poços de sucção) Tanques de Transição	Corrosão das armaduras e Desagregação do Concreto
Unidades de Tratamento Primário	
Desarenadores Calha Parshall Canais de Grades	Erosão
Unidades de Tratamento Primário	
Decantadores	Não foi possível identificar uma manifestação típica proporcionada pelo processo de tratamento desenvolvido nesta unidade
Unidades de Tratamento Secundário	
Reatores UASB	Forte Desagregação do Concreto
Unidades de Tratamento Terciário	
Tanques de Cloração ou Tanques de Contato	Ataques por Cloretos
Tanques de Nitrificação Desnitrificação	Lixiviação do Concreto e Ataque Ácido

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este último capítulo apresenta as conclusões obtidas na análise sobre a influência das características do esgoto na degradação do concreto e também sobre os aspectos relevantes da avaliação das estruturas de concreto da ETE avaliada. Apresentam-se, também, sugestões para pesquisas futuras na sequência.

5.1 CONCLUSÕES

A ETE foi avaliada de acordo com os aspectos operacionais, com uma abordagem voltada à durabilidade das suas unidades de tratamento construídas em concreto armado.

A partir das análises realizadas verificou-se que:

- As características do tratamento de esgotos possuem forte influência sobre a deterioração do concreto conforme foi verificado na literatura e evidenciado nas discussões dos resultados. Essas características podem induzir deteriorações no concreto de forma indireta, como é o caso da DBO, DQO, temperatura, pH e tempo de detenção hidráulica e também de forma direta como a geração de sulfetos oriundos da oxidação de sulfatos, atrito dos sólidos da areia nas unidades;
- Os mecanismos de deterioração nas unidades de tratamento possuem boa correlação com os processos que ocorrem dentro das unidades. Observou-se erosão um pouco mais intensa no canal que conduz o esgoto ao desarenador, mesmo com uma velocidade relativamente baixa de 1 m/s.
- No poço de sucção, grade grossa e tanque de transição, devido à turbulência, ocorre maior desprendimento de gases no esgoto que favorece o aparecimento de sinais de desagregação do concreto e muitos pontos de corrosão. No Tanque de Armazenagem de Lodo, observou-se também vários pontos de corrosão, porém nesse caso ocasionado pela baixa presença de oxigênio e pela profundidade e confinamento da unidade, tornando o ambiente propício à digestão anaeróbia e, conseqüentemente, maior produção de gás sulfídrico;
- As unidades de tratamento preliminar foram as mais deterioradas na estação, pois além de serem as unidades com maior teor de sulfetos em sua atmosfera e,

consequentemente, maior acidez ambiental, são submetidas ainda ao atrito de materiais de elevada dureza que adentram a estação;

- Relativo à metodologia GDE/UnB, durante a primeira avaliação, as propostas de mudanças promoveram uma majoração do grau de deterioração das estruturas de concreto calculado e, desta forma, foram adotados os fatores de ponderação propostos por Fonseca (2007) com a mínima alteração possível, o que se mostrou muito viável e coerente com a sensibilidade do avaliador;
- Os ensaios diagnósticos do concreto foram importantes para auxiliar na aplicação da metodologia, entretanto o ensaio de resistividade não apresentou resultados conclusivos, o que pode ter sido causado pela quantidade de interferências que ensaios de campo podem apresentar, onde não é possível controlar todas as variáveis que possuem potencial para interferir nos resultados;
- A estação de tratamento encontra-se com Grau de Deterioração 94, considerado alto, o que significa que a manutenção das estruturas de concreto necessita ser feitas dentro de no máximo um ano e deverão ser priorizadas as que apresentaram o maior grau de deterioração dentre as unidades de tratamento avaliadas, como o Tanque de Transição;
- Com relação ao estado de conservação, constatou-se que as prescrições de projeto, de maneira geral, apresentaram parâmetros aceitáveis e de acordo com as normativas vigentes à época de elaboração do projeto e que contribuem para a durabilidade das estruturas;
- Com exceção do Tanque de Transição, todas as unidades apresentaram aspectos executivos que contribuem para a durabilidade das estruturas e atenderam, em sua maioria, ao preconizado em projeto;
- Como a estação, com 14 anos de idade, ainda não passou por manutenção intensa, necessita-se da criação de um plano de manutenção para a ETE de forma a prolongar sua vida útil e manter os requisitos mínimos de segurança e operação.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Durante a pesquisa perceberam-se alguns aspectos que podem ser avaliados em pesquisas posteriores, assim, sugerem-se alguns assuntos a serem estudados:

- Aplicação da adaptação da metodologia para avaliação de ETEs em uma maior quantidade de estações de tratamento de esgotos para consolidar a metodologia;

- Aplicação da adaptação da metodologia em estações com o mesmo porte e idade, porém com processos de tratamento diferentes para verificar a influência das diversas configurações de ETEs existentes com a deterioração do concreto;
- Verificar a possibilidade de utilização da areia do desarenador na confecção de concretos e argamassas uma vez que sua distribuição granulométrica se adequou completamente aos parâmetros da zona ótima de areias prevista na NBR 7211 (ABNT, 2005);
- Estudo para propostas de soluções que possam auxiliar e facilitar a realização de manutenções em ETEs, uma vez que as interrupções causam diversos transtornos à sociedade e meio ambiente;
- Avaliar unidades de tratamento comparando o desempenho das faces internas e externas das estruturas de concreto.
- Avaliação do teor de sulfetos no ambiente e no meio líquido, DBO, DQO, oxigênio dissolvido, sulfatos em função do tempo de detenção hidráulica dos decantadores e seus efeitos sobre a deterioração do concreto.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655**: Preparo, controle e recebimento de concreto. Rio de Janeiro, 2015. 23p.

ABNT_____.**NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014. 238p.

ABNT_____.**NBR 7680-1**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015. 27p.

ABNT_____.**NBR 9204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 12p.

ABNT_____.**NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 10p.

ACI – American Concrete Institute. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (318R-05), ACI Committee 318 (2008)**, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ANDRELLO, J. M. ; GALLETTO, A. **Projeto de Impermeabilização e Proteção Anticorrosiva para Reatores Anaeróbios de Estação de Tratamento de Esgoto - Estudo de Caso**. In: 14º Simpósio Brasileiro de Impermeabilização, 2015, São Paulo - SP. SP: IBI - Instituto Brasileiro de Impermeabilização, 2015.

ANTUNES, R. M. V. **Contribuição para o Estudo de Odores em Estações de Tratamento de Águas Residuais Urbanas**. 2006. 299 p. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2006.

AGUIAR, J. E de. **Estudos das Características Técnicas e Operacionais das Galerias de Águas Pluviais como Subsídios para Gestão Patrimonial e Estabelecimento de Diretrizes para Projetos de Sistemas de Drenagem Urbana**. 2012. 279 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ALMEIDA, I. R. **Influência da resistência à abrasão do agregado graúdo na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho**. In: 42 Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza, 2000.

ALMEIDA, P.E.D.; AMARO P.R. **Aplicação de um plano de inspeção e manutenção na Usina Hidrelétrica de Tucuruí.** In: X Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção Civil - A Manutenção na Construção Civil, p 2-23, EPUSP, S. Paulo, Novembro. 1989.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM C-114 Standard Test Method Chemical Analysis of Hydraulic Cement.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM_____. **ASTM C876 Standard Test Method Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete,** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

ATTIOGBE, E.K.; RIZKALLA, S.H. Response of concrete to sulfuric acid attack. **ACI Materials Journal**, 85-M46, 481–488, 1988.

BAYNE, H. The Basics of Deteriorating Concrete at Wastewater Plants: Tips on Causes, Repair, and Resources. **JPLC**, p. 47-54, 2009.

BERTOLINE, L. **Materiais de construção: Patologia, reabilitação e prevenção.** Apresentação Paulo Helene. Editora Oficina de Textos: São Paulo, 2006.

BIRINDELLI, L.O.; KNAPP, L.M.; BORELLI, N.L.M.; BORGES, L.A.; GONÇALVES, A.C. **Desenvolvimento e implantação de plano de manutenção de reservatórios e Travessias.** In 36ª Reunião Anual do IBRACON, Instituto Brasileiro do Concreto, Porto Alegre, RS, p. 53-65, Vol 1, Setembro, 1994.

BOLDO, P. **Avaliação quantitativa de estruturas de concreto armado de edificações no âmbito do Exército Brasileiro.** 2002. 312 p. Dissertação (Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2002.

BOND, P. L., KELLER, J., JIANG, G. Determining the long-term effects of H₂S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion. **Water Research** Volume 65. 157-169 DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.026, 2014.

BOTTER, R. R. **Investigação do nível de deterioração de estruturas de concreto armado: estudo de caso no campus da universidade Estadual de Maringá.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BSI – British Standards Institution. **BS 8500-1:Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier,** British

Standard, 389, Chiswick High Road, London W4 4AL.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** – 2014. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016. 212 p.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. Pini, Editora UFG, Goiânia, 1997.

CASCUDO, O. **Inspeção e diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão da armadura**. In: ISAIA, G. C., ed. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2005. 2 v., p. 1071-108.

CASCUDO, O. ; CARASEK, H. . **Ação da Carbonatação no Concreto**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ed.São Paulo: IBRACON, 2011, v. 1, p. 849-885.

CASTRO, E. K. **Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado**. 1994. 139 p. Dissertação (Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia). Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 1994.

CERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Princípios do tratamento Biológico de Águas Residuárias. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. 2. Ed. Belo Horizonte, 1997. 380 p.

CERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M.; SOUZA, C. L.; MELO, G. C. B. Alternativas para o controle de emissões odorantes em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.15, n.3,p. 229-236. 2010.

CHOI, S; BOLANDER, J. E. A. Topology Measurement Method Examining Hydraulic Abrasion of High Workability Concrete. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 16 (5), p.771-778. 2012. DOI 10.1007/s12205-012-1135-2

CORSINI, R. Ambientes Agressivos. **Revista Técnica**. Edição 196. Julho, 2013.

COSTA, R. M. **Análise de Propriedades Mecânicas do Concreto Deteriorado pela Ação de Sulfato Mediante Utilização do UPV**. 2004. 246 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa De Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

COSTA, H. O. **Avaliação de patologias em obras de arte especiais utilizando a**

metodologia GDE/UnB. 2016. 66 p. Trabalho de Curso (TC) apresentado como um dos requisitos para conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB– Centro Universitário de Brasília. Brasília, 2016.

DAVIS, J. L.; NICA, D.; SHIELDS, K.; ROBERTS, D.J. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. **International Biodeterioration & Biodegradation**, vol. 42(1), p.75–84, 1998.

DIAS, N. G.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. **Manifestações patológicas em estruturas de concreto de estações de tratamento de esgoto.***In:*II Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão. LNEC. Lisboa, Portugal. 2016.

DNER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM. **Inspeção e vistorias em 92 pontes e viadutos de concreto armado e protendido.**Procedimento No 123/87, Fevereiro.

EN 206-1: 2000. **European Standard. Concrete: Part I: Specification, Performance, Production and Conformity.**European Committee for Standardisation.

EUQUÉRES, P. **Metodologia de Inspeção em Estruturas de Pontes de Concreto Armado.** 2011. 168 p. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da UFG. Goiânia, 2011.

FELSKE, V. S.; GUARENTI, J. L.; RODRIGUES, N. D.; GUIMARÃES, A. T. C. Estudo do concreto armado em uma indústria de fertilizantes em situado em zona marinha. In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2., 2004, Rio Grande. **Anais eletrônicos...** Rio Grande, 2004. Disponível em: <http://www.semengo.furg.br/2004/16_2004.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2017.

FERREIRA, B. M. **Análise quantitativa da Ponte do Bragueto – DF utilizando a metodologia GDE/UnB.** 2016. 107 p. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília – UniCEUB. Brasília, 2016.

FERNANDES, I.; PERICÃO, M.; HAGELIA, P.; NORONHA, F.; RIBEIRO, A.; MAIA, J. Identification of acid attack on concrete of a sewage system. **Materials and Structures**. vol. 45, p. 337–350, 2012. DOI 10.1617/s11527-011-9769-y

FILHO, J. H.; RHEINHEIMER, B.; KHOE, S. S.; ARTIGAS, L. V.; SABBAG, A. F.; MEDEIROS, M. H.F. Degradação do concreto de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por ácido sulfúrico biogênico. **Revista ALCONPAT**, vol. 4, n. 2, p. 84-96, 2014

FONSECA, R. P. **A estrutura do Instituto Central de Ciências: Aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção.** 2007. 231 p. Dissertação (Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia).

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Distrito Federal, 2007.

GARLICH, J. M. **A comprehensive approach to life extension of wastewater treatment facilities, Proceedings of the International Conference on Repair and Renovation of Concrete Structures.** International Congress - Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, p 419 - 426, 2005. ISSN ISBN-10.

GAYLARDE, C. C.; GAYLARDE, P. M. **Biodeterioration of Historic Buildings In LatinAmerica.** Departamento Biophysics e MIRCEN: DBMC. 2002.

GIANNANTONIO, D. J.; KURTH, J. C.; KURTIS, K. E.; SOBECKY, P. A. Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. **International Biodeterioration & Biodegradation**, vol 63, p. 252–259, 2009.

GONÇALVES, M. D. O. **Marqueses de Concreto Armado da Cidade de Viçosa-MG: Manifestações Patológicas, Inspeção e Avaliação de Grau de Deterioração.** 2011. 200 p. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

GRASEL, A. M. **Determinação de Sulfeto de Hidrogênio nas Proximidades de Estação de Tratamento de esgotos em Curitiba-PR, Brasil.** 2014. 88 p. Dissertação (Mestrado Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental). Curitiba, 2014.

GU, J.; FORD, T. E.; BERKE, N. S.; MITCHELL, R. Biodeterioration of concrete by the fungus *Fusarium*. **International Biodeterioration & Biodegradation**, vol 41, p. 101-109. Elsevier Science. 1998.

GUIMARÃES, L. E.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. **Proposta de metodologia para avaliação comparativa do grau de deterioração em edificações,** In: VII Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, 2003.

GOSTELOW, P.; PARSONS, S. A.; STUETZ, R. M. Odour Measurements for Sewage Treatment Works, **Water Researches.** Vol. 35, No. 3, p. 579 - 597, 2001.

HEWAYDE, E.; NEHDI, M.; ALLOUCHE, E.; NAKHLA, G. Effect of geopolymer cement on microstructure, compressive strength and sulfuric acid resistance of concrete. **Magazine of Concrete Research**, vol 58(5), p. :321–331, 2006.

JENSEN, H. S. **Hydrogen sulfide induced concrete corrosion of sewer networks.** (1. ed.) Aalborg: Institut for Kemi, Miljø og Bioteknologi, Aalborg Universitet. 2009.

JÚNIOR, J. A. **Avaliação do grau de dano da estrutura do prédio do Campus Henrique Santillo, da Universidade Estadual de Goiás: aplicação da metodologia GDE/UnB e propostas e estratégias para manutenção.** 2015. 121 p. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso I submetido ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Goiás. Anápolis, 2015.

KALTWASSER, H. Destruction of Concrete by Nitrification. **European Journal of Applied Microbiology.** Vol, 3, p.185-192, 1976.

KIM, S.; LEE, S. Microstructural Observations on the Deterioration of Concrete Structure for Sewage Water Treatment. **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol. 14(5), p. 753-758, 2010.

KLEIN, D.; GASTAL, F.; CAMPANOLO, J.L.; SILVA FILHO, L. C. **Critérios adotados na vistoria de obras de arte.** In: XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Porto Alegre, p. 185-196, Novembro. 1991.

KORMANN, A.C.M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens.** 2002. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

LANER, F. J. **Manifestações Patológicas nos Viadutos, Pontes e Passarelas do Município de Porto Alegre.** 2001. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEEMANN, A.; LOTHENBACH, B.; SIEGRIST, H.; HOFFMANN, C. Influence of water hardness on concrete surface deterioration caused by nitrifying biofilms in wastewater treatment plants. **International Biodeterioration & Biodegradation**, p. 489-498, 2010.

LEITE, V. D.; SILVA, J. B. P.; SOUSA, J. T. de; ATHAYDE JÚNIOR, G. B.; SILVA, J. V. do N. **Estimativa do potencial de corrosão e toxicidade e ocorrência de odores desagradáveis devido às espécies de enxofre presentes em águas residuais.** In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, 2001.

LEMOS, S. P. P. **Avaliação do Grau de Dano das Estruturas do Subsolo de Três Edifícios Situados na Região Metropolitana do Recife/PE.** 2006. Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2006.

LOPES, B. A. R. **Sistema de manutenção predial para grandes estoques de edifícios: Estudo para inclusão do componente “Estrutura de Concreto”.** 1998. Dissertação (

Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia). Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 1998.

MACEDO, C. **Manutenção das vias permanentes do Metrô São Paulo**. X Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção Civil - A Manutenção na Construção Civil, EPUSP, pp 39- 46, S. Paulo, Novembro. 1989.

MAHMOODIAN, M.; ALANI, A. M. Multi-Failure Mode Assessment of Buried Concrete Pipes Subjected to Time-Dependent Deterioration, Using System Reliability Analysis. **Journal Fail. Anal. and Preven.** Vol. 13, p. 634–642, 2013. DOI 10.1007/s11668-013-9727-9

MALHOTRA, V.; CARINO, N. **Handbook on nondestructive testing of concrete**. 2. ed. United States of America: CRC Press LLC, 2004.

MATOS, R. P. D. **Estrutura da plataforma superior da Estação Rodoviária de Brasília: Análise de intervenções e avaliação pós-reparo**. 2009. 190 p. Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília Brasília. Brasília, 2009.

MARQUEZ-PEÑARANDA J. F.; SANCHEZ, M. Effects of biodeterioration on the mechanical properties of concrete. **Materials and Structures**, vol 49, p. 4085–4099. 2016.

MARTINS, N. P. Priorização na Resolução de Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado: Método GUT. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**. Vol.2, No.3, 2017. <http://dx.doi.org/10.25286/rep.v2i3.707>.

McNALLY, C.; O'CONNELL, M.; RICHARDSON, M. G. Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. **Cement & Concrete Composites**, vol. 32, p. 479–485, 2010.

MEDEIROS, A. G. D. **Análise de durabilidade da ponte do rio do carmo utilizando ensaios não destrutivos, norma DNIT e a metodologia GDE/UnB**. 2015. 165 p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: IBRACON, 2008. (TRADUÇÃO)

MENDES, M. V. A. da S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa contendo asições minerais**. 2009. 175 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MENDES, V. G. **Avaliação quantitativa dos danos na estrutura de concreto armado da biblioteca central da UnB e proposta de plano de gestão da manutenção dos edifícios da universidade**. 2014. 86 p. Trabalho de projeto final submetido ao departamento de engenharia civil e ambiental da universidade de Brasília Brasília, 2014.

METCALF; EDDY, Inc. “**Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse**”. McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York, 1991.

MITRE, M. P. **Metodologia para inspeção e diagnóstico de pontes e viadutos de concreto**. 2005. 139 p. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo São Paulo, 2005.

MONTENY, J.; VINCKE, E.; BEELDENS, A.; DE BELIE, N.; TAERWE; L.; VAN GEMERT, D. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. **Cement and Concrete Research**. vol. 30(4), p. 623–34, 2000.

MORADIAN, M.; SHEKARCHI, M.; PARGAR. F.; VALIPOUR, M. Deterioration of Concrete Caused by Complex Attack in Sewage Treatment Plant Environment .American Society of Civil Engineers. **Journal Of Performance Of Constructed Facilities**. February, 2012, 26(1): 124-134

MOREIRA, A. L. A. **A estrutura do Palácio da Justiça em Brasília: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de estratégias para manutenção**. 2007. 164 p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil Publicação E. DM – 005A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MORI, T.; NONAKA, T.; TAZAKI, K.; KOGA, M.; HIKOSAKA, Y.; NODA, S. Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes. **Water Research**, V. 26, No. 1, p. 29-37, 1992.

MTE — Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 33: SEGURANÇA E SAÚDE NOS TRABALHOS EM ESPAÇOS CONFINADOS**. [S.l.]: [s.n.], 2012.

MTE_____. **NR 35: TRABALHO EM ALTURA**. [S.l.]: [s.n.], 2014.

NETO, P.; MARÇAL, M.; NICOLAU, M. **Estudo comparativo entre métodos de avaliação de edificações**. In: XIII Semana de Engenharia da UFF, VII Seminário Fluminense de Engenharia, Niterói, p. 17-21, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giamusso. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Rio Grande do Sul: Bookman Editora Ltda, 2016. 887p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2013.

NICA, D.; DAVIS, J. L.; KIRBY, L.; ZUO, G.; ROBERTS, D.J. Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers. **International Biodeterioration & Biodegradation**, vol. 46, p. 61 – 68, 2000.

OLIVEIRA, P. L. S. **Avaliação da Estrutura do Prédio Central da UFERSA: Histórico de Projeto, Execução, Intervenções e Estratégias para Manutenção**. 2013. 105 p. Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará Mossoró, 2013.

OLIVEIRA, J. D. A. L. **Avaliação de estruturas de edifícios em concreto armado com vistas à reabilitação**. 2008. 115 p. Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

PCA. Portland Cement Association. **Concrete Information: Types and Causes of Concrete Deterioration**. PCA R&D Serial No. 2617, 2002.

PEREIRA, H. W. B. **Identificação das condições gerais de conservação nos reservatórios integrantes do sistema de abastecimento de água de Natal**. 2014. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

PRADO, G. S. D.; CAMPOS, J. R. Determinação da quantidade de areia no esgoto sanitário: metodologia e estudo de caso, **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 13, p. 306 – 312, 2008.

QASEM, A. **Performance Assessment Model for Wastewater Treatment Plants**. 2011. 327 p. Thesis presented in Concordia University Montreal, Quebec, Canadá, 2011.

PESSOA, D. F. **A estrutura da Catedral de Brasília: aspectos históricos, científicos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e proposta de manutenção**. 2002. 282 p. Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2002.

REAL, L. V.; OLIVEIRA, R. B.; SOARES, T.; MEDEIROS, M. H. F. Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte. **Revista ALCONPAT**, Vol. 5, N. 2, Páginas 149 – 159, 2015.

REPETTE, W. L.; HELENE, P. **Proteção do concreto: uma necessidade em indústrias de celulose e papel**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. BT/PCC/204. EPUSP: 1998.

ROMANOVA, A.; MAHMOODIAN, M.; ALANI, M. A. Influence and Interaction of Temperature, H₂S and pH on Concrete Sewer Pipe Corrosion. **International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering** Vol. 8, No. 6, 2014.

SADOVSKI, A. **Teor crítico de cloretos para iniciação da corrosão do aço no betão. Influência do estado de superfície da armadura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Biológica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, no Núcleo de Materiais Metálicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2014.

SANEAGO – Saneamento de Goiás SA. Laudo Padrão de Resultados de Análise de Esgotos. Goiânia, 2016.

SANEAGO – Saneamento de Goiás SA. Laudo Padrão de Resultados de Análise de Esgotos. Goiânia, 2017.

SANEAGO – Saneamento de Goiás SA. Monitoramento de Sulfetos na Atmosfera da ETE Goiânia. Goiânia, 2017.

SANTOS, E. C. R.; CLÍMACO, J. C. T.; NEPOMUCENO, A. A. A estrutura do Palácio do Itamaraty em Brasília: aspectos históricos e tecnológicos de projeto, execução, intervenções e manutenção. **Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, vol. 7 (2-3), p. 229 – 238, 2004.

SANTOS, V. A. A.; VALENZUELA, F. A. O.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V. C. Fundamentos e testes preliminares de resistência a erosão em concretos refratários. **Cerâmica**, vol 52, p. 128-135, 2006.

SANTOS, E. M. B. dos. **Avaliação experimental do comportamento de fratura e de erosão de concreto refratário antierosivo**. 2012. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais Escola de Engenharia de Lorena. USP, 2012.

SARICIMEN, H.; SHAMEEM, M.; BARRY, M. S.; IBRAHIM, M.; ABBASI, T.A. Durability of proprietary cementitious materials for use in wastewater transport systems. **Cement & Concrete Composites**. vol. 25(4), p. 421–427, 2003.

SARRAY, A. A. **The Deterioration of Concrete in Wastewater Treatment Plants**. 2013. 75 p. Dissertation Institute of Graduate Studies and Research, Eastern Mediterranean University. Gazimağusa, North Cyprus, 2013.

SHIRAKAWA, M. A. **Estudo da Biodeterioração do Concreto por *Thiobacillus***. 1994. 137 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SILVA, A. B. **Avaliação da produção de odor na estação de tratamento de esgoto Paranoá e seus problemas associados**. 2007. 132 p. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Brasília, 2007.

SILVA, L. S. P. da (2008). **Estruturas do Monumento a Caxias e do Teatro Pedro Calmon em Brasília: Histórico de Projeto, Execução e intervenções e estratégias para manutenção**. 2008. 183 p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM – 014A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

SOARES, F. S. **A estrutura da torre de TV digital de Brasília: aspectos históricos e tecnológicos de projeto, intervenções e proposta de manutenção**. 2017. 192 p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília, 2017.

SOUZA, R. B. **Suscetibilidade de Pastas de Cimento ao Ataque por Sulfatos – Método de Ensaio Acelerado**. 2006. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica USP, São Paulo, 2006.

SOUZA, D. A. S. **A Estrutura do Teatro Nacional Cláudio Santoro em Brasília: Histórico de Projeto, Execução, Intervenções e Estratégias para Manutenção**. 2009. 150 p. Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

STANASZEK-TOMAL, E.; FIERTAK, M. Biological Corrosion in The Sewage System and The Sewage. **Procedia Engineering**, vol. 161, p. 116 – 120, 2016.

VERLY, R. C. **Avaliação de metodologias de inspeção como Instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais**. 2015. 198 p. Dissertação de Mestrado em

Estruturas e Construção Civil Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2015.

VITÓRIO, J. A. P. Avaliação do grau de risco estrutural de pontes rodoviárias de concreto. *In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2008 – 50CBCxxxx. 2008*

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** 4. Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

XAVIER, J. P. M. **Influência de Projetos e Detalhes Arquitetônicos em Patologias de Estruturas: Estudo de Caso.** 2010. 155 p. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação. E. DM - 007A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

YONGSIRI, C.; ASCE, S. M.; VOLLERTSEN, J.; HVITVED-JACOBSEN, T. Effect of Temperature on Air-Water Transfer of Hydrogen Sulfide. **Journal of Environmental Engineering**, Vol. 130, No. 1, January 1, 2004. ©ASCE, ISSN 0733-9372/2004/1-104–109/50 (4), 161e168, 2004.

APÊNDICE A

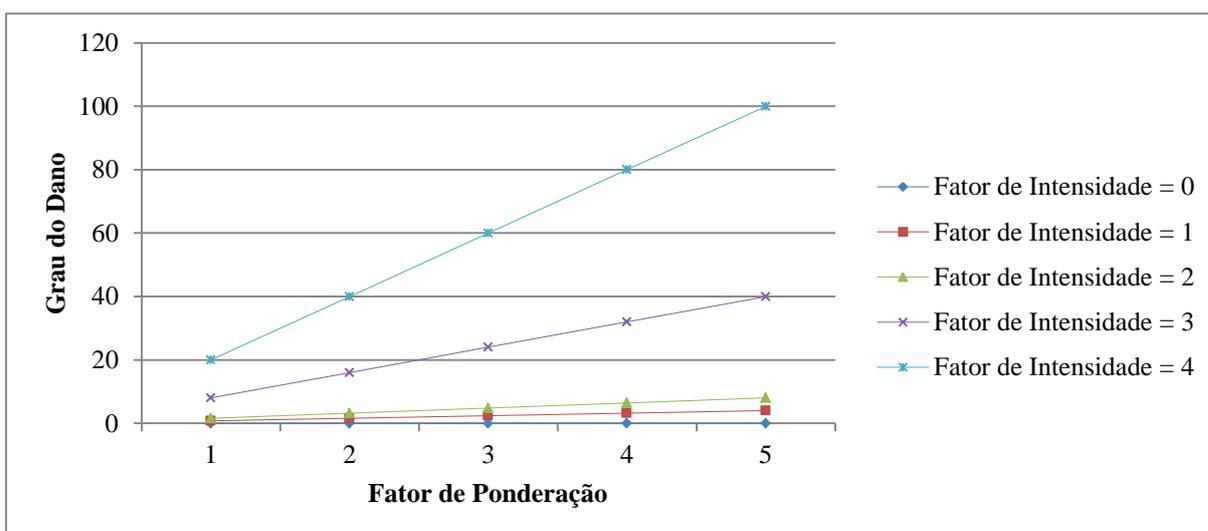
ANÁLISE DA METODOLOGIA GDE/UnB

A seguir são apresentados as tabelas e gráficos obtidos na análise do comportamento gráfico da metodologia GDE/UnB com base nas considerações e faixas de classificação propostos por Fonseca (2007). As simulações foram realizadas considerando-se os maiores fatores de intensidade com todos os Fatores de Ponderação buscando visualizar os piores cenários de deterioração. A Tabela A.1 mostra a variação do Grau de Dano em função dos fatores de intensidade e de ponderação e na Figura A.1 é possível verificar o comportamento gráfico do Grau Dano com a variação dos f_i e f_p dos elementos estruturais.

Tabela A.1 - Variação do Grau de Dano em função do Fator de Intensidade e Fator de Ponderação

Fp	Fi				
	0	1	2	3	4
1	0	0,8	1,6	8	20
2	0	1,6	3,2	16	40
3	0	2,4	4,8	24	60
4	0	3,2	6,4	32	80
5	0	4	8	40	100

Figura A.1 – Variação do Grau de Dano em função do Fator de Ponderação e do Fator de Intensidade



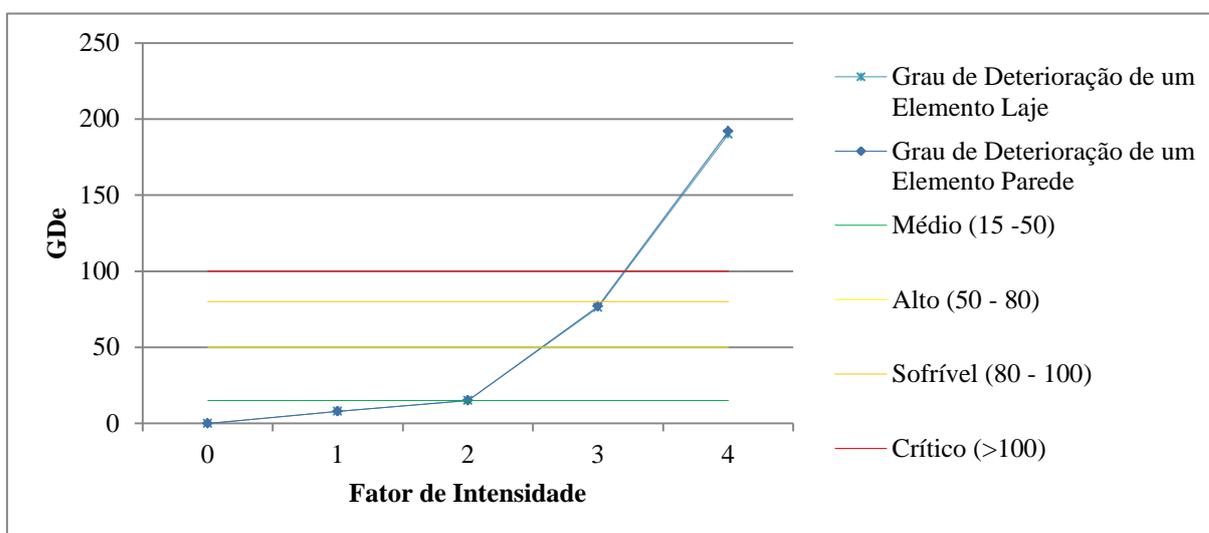
A Tabela A.2 apresenta a variação do Grau de Deterioração do Elemento estrutural de acordo com a variação da intensidade das manifestações patológicas e a Figura A.2 apresenta

graficamente a classificação dos níveis de classificação do Grau de Deterioração do Elemento estrutural em função da intensidade do dano. Nota-se que as faixas de classificação se apresentam muito próximas umas das outras.

Tabela A.2 - Variação do Grau de Deterioração do Elemento em função do Fator de Intensidade

Grau de Deterioração de um Elemento	Fi				
	0	1	2	3	4
Laje	0	8	15	76	190
Parede	0	8	15	77	192

Figura A.2 – Variação do Grau de Deterioração do Elemento em função do Fator de Intensidade



A quantidade de elementos estruturais influencia no resultado final do cálculo do grau de deterioração da família de elementos. Assim, as Tabela A.3 e Tabela A.4 foram elaboradas calculando-se o grau de deterioração com determinada quantidade de elementos estruturais até que o GDe não mais fosse influenciado pela quantidade de elementos incluídos no cálculo. Para estruturas com apenas um elemento estrutural laje, o GDe era de 190 e com a estabilização em 28 lajes chegava em 266 e para as paredes, o GDe variava de 192 com somente 1 elemento estrutural e a estabilização ocorria no patamar de 269 com 23 elementos estruturais, conforme pode ser observado claramente nas Figura A.3, Figura A.4 e Figura A.5. Da mesma forma, observa-se também que a classificação dos níveis de deterioração está bastante concentrada, desta forma, optou-se por alterar as faixas de classificação da estrutura originando a Tabela 3.14.

Tabela A.3 - Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Lajes em função da quantidade de elementos estruturais

Grau de Deterioração de Famílias					
Lajes	Fi				
	0	1	2	3	4
1	0	0	15	76	190
2	0	0	18	93	233
3	0	0	19	98	245
4	0	0	20	101	251
5	0	0	20	102	255
6	0	0	20	103	257
7	0	0	20	104	259
8	0	0	21	104	260
9	0	0	21	104	261
10	0	0	21	105	262
11	0	0	21	105	263
12	0	0	21	105	263
13	0	0	21	105	263
14	0	0	21	106	264
15	0	0	21	106	264
16	0	0	21	106	264
17	0	0	21	106	265
18	0	0	21	106	265
19	0	0	21	106	265
20	0	0	21	106	265
21	0	0	21	106	265
22	0	0	21	106	266
23	0	0	21	106	266
24	0	0	21	106	266
25	0	0	21	106	266
26	0	0	21	106	266
27	0	0	21	106	266
28	0	0	21	107	266
29	0	0	21	107	266
30	0	0	21	107	266

Figura A.3 – Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Lajes em função da quantidade de elementos estruturais

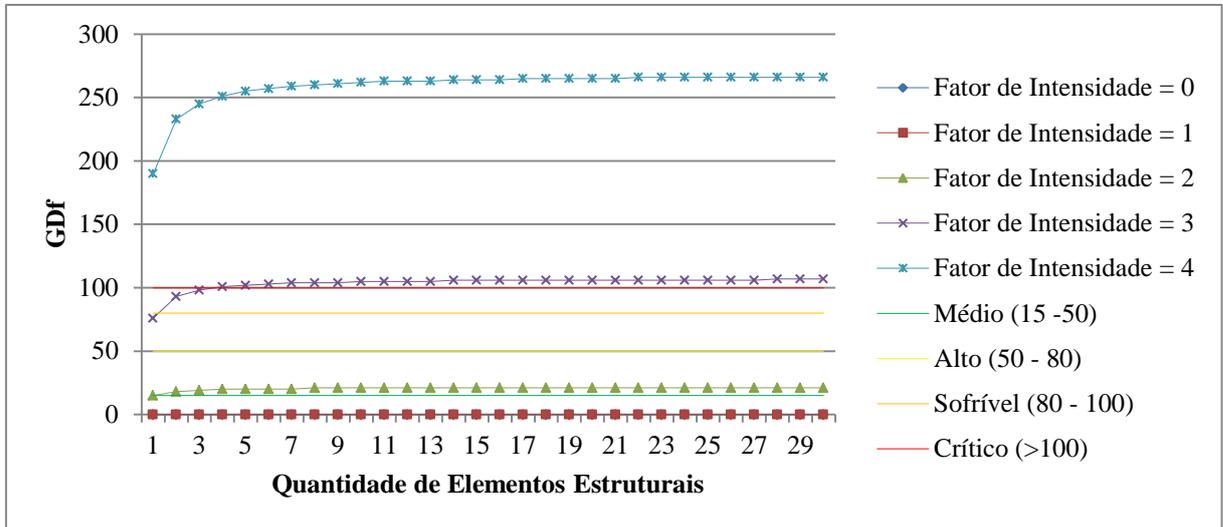


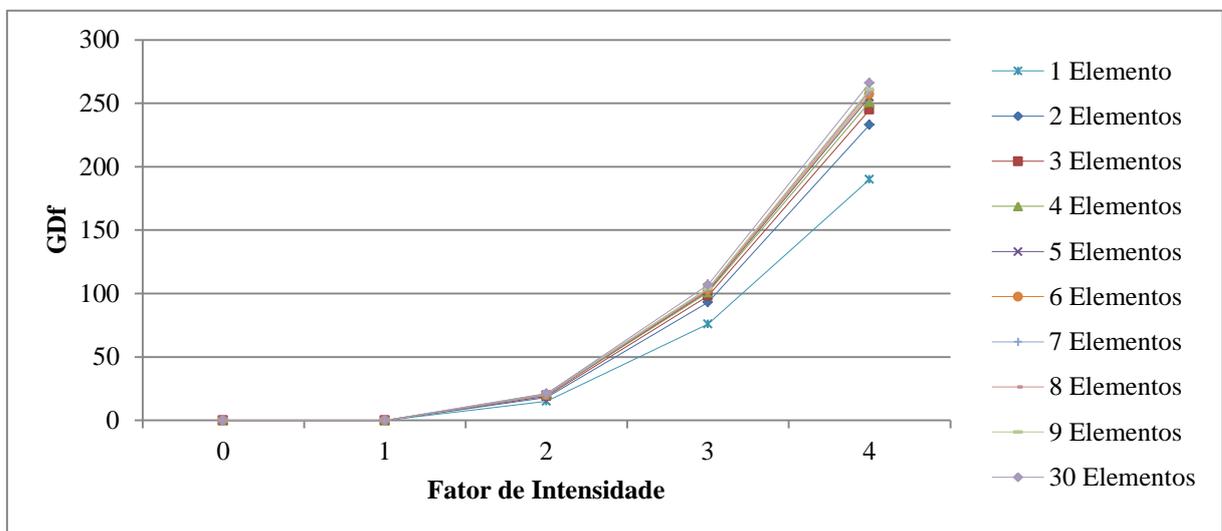
Tabela A.4 - Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Paredes em função da quantidade de elementos estruturais

Grau de Deterioração de Famílias					
Quantidade de Paredes da estrutura	Fi				
	0	1	2	3	4
1	0	0	15	77	192
2	0	0	18	94	235
3	0	0	19	99	248
4	0	0	20	102	254
5	0	0	20	103	258
6	0	0	20	104	260
7	0	0	20	105	262
8	0	0	21	105	263
9	0	0	21	106	264
10	0	0	21	106	265
11	0	0	21	106	265
12	0	0	21	107	266
13	0	0	21	107	266
14	0	0	21	107	267
15	0	0	21	107	267
16	0	0	21	107	267
17	0	0	21	107	268
18	0	0	21	107	268
19	0	0	21	107	268
20	0	0	21	108	268
21	0	0	21	108	268
22	0	0	21	108	268
23	0	0	21	108	269

Continuação Tabela A.4 - Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos Paredes em função da quantidade de elementos estruturais

Grau de Deterioração de Famílias					
Quantidade de Paredes da estrutura	Fi				
	0	1	2	3	4
24	0	0	21	108	269
25	0	0	21	108	269
26	0	0	21	108	269
27	0	0	21	108	269
28	0	0	21	108	269
29	0	0	21	108	269
30	0	0	21	108	269

Figura A.5 – Variação do Grau de Deterioração da Família de Elementos em função do Fator de Intensidade



APÊNDICE B

FICHAS DE AVALIAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS DAS UNIDADES

Esse Apêndice B apresenta as Fichas de Avaliação de cada elemento estrutural avaliado na ETE e foram a base para os resultados apresentados no item 4.4.

Tabela B.1 – Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGL1

Nome do Elemento	GGL1	D _{máx}	40		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3		0	<p style="text-align: center; font-size: small;">GRUPO DE LAMINAÇÃO MANUAL ESPESURA DE LAMINAÇÃO = 10mm ESPACAMENTO ENTRE LAMINAS = 1"</p>	
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	3	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	3	40		
Desagregação	3	0	0		
Deslocamento por Empuxo			0		
Desvios de Geometria			0		
Eflorescências	2	4	40		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5	2	8		Foto do Elemento Estrutural
Desplacamento	3	3	24		
Manchas	3	2	4,8		
Sinais de Esmagamento			0		
Umidade	3	3	24		
Flechas	5	1	4		
Erosão			0		
Grau de deterioração de um elemento GGL1		69			

Tabela B.2 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP1

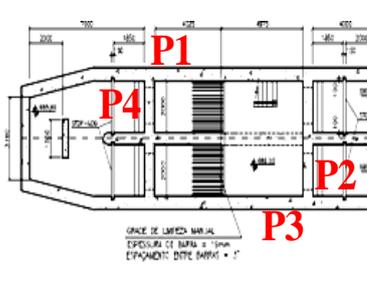
Nome do Elemento	GGP1	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	3	24	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	2	8	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	3	16	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	2	8	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento GGP1			15	

Tabela B.3 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP2

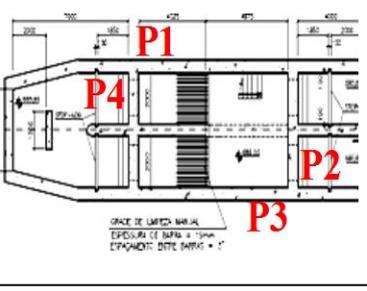
Nome do Elemento	GGP2	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	3	24	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	3	16	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	2	8	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento GGP2			38	

Tabela B.4 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP3

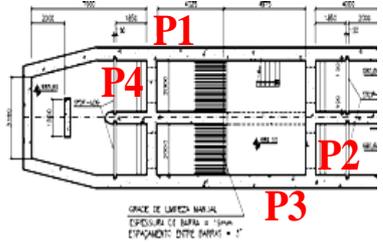
Nome do Elemento	GGP3	D _{máx}	4,8	Croqui 
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	Foto do Elemento Estrutural
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento GGP3			8	

Tabela B.5 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GGP4

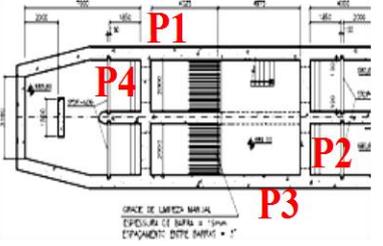
Nome do Elemento	GGP4	D _{máx}	4	Croqui 
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3		0	
Cobrimento Deficiente	3		0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	Foto do Elemento Estrutural
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento GGP4			4	

Tabela B.6 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSL1

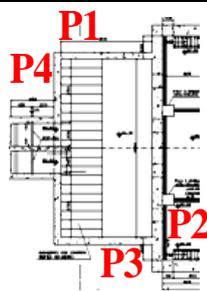
Nome do Elemento	PSL1	D _{máx}	100	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3		0	
Cobrimento Deficiente	3		0	
Contaminação por Cloretos	3	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	4	100	
Desagregação	3	3	24	
Deslocamento por Empuxo			0	
Desvios de Geometria			0	
Eflorescências	2		0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	1	2,4	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento			0	
Umidade	3	0	0	
Flechas	5	0	0	
Erosão			0	
Grau de deterioração de um elemento PSL1			123	

Tabela B.7 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP1

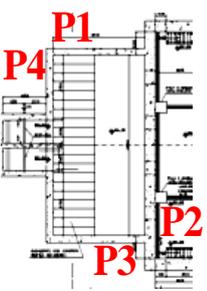
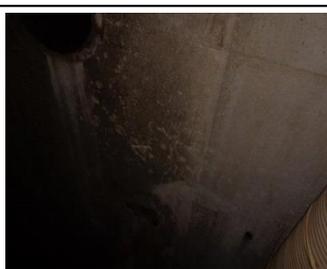
Nome do Elemento	PSP1	D _{máx}	24	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3		0	
Cobrimento Deficiente	3		0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5		0	
Desagregação	3	3	24	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	1	2,4	
Manchas	3	1	2,4	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento PSP1			32	

Tabela B.8 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP2

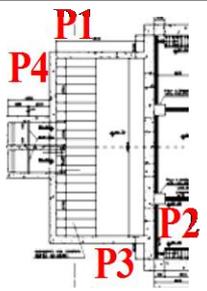
Nome do Elemento	PSP2	D _{máx}	24		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3		0		
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	2	8		
Desagregação	3	3	24		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5	1	4	<p>Foto do Elemento Estrutural</p> 	
Desplacamento	3	0	0		
Manchas	3	1	2,4		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	1	2,4		
Flechas			0		
Erosão	4		0		
Grau de deterioração de um elemento PSP2			34		

Tabela B.9 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP3

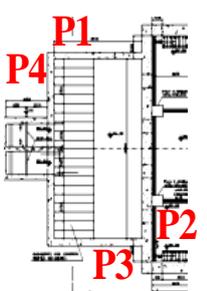
Nome do Elemento	PSP3	D _{máx}	24		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3	1	2,4		
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	0	0		
Desagregação	3	3	24		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5	1	4	<p>Foto do Elemento Estrutural</p> 	
Desplacamento	3	2	4,8		
Manchas	3	0	0		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	1	2,4		
Flechas			0		
Erosão	4		0		
Grau de deterioração de um elemento PSP3			34		

Tabela B.10 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural PSP4

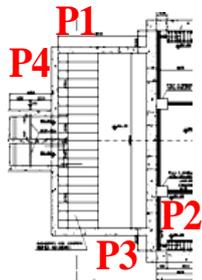
Nome do Elemento	PSP4	Dmáx	24	Croqui	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano		
Carbonatação	3	2	4,8		
Cobrimento Deficiente	3	0	0		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5		0		
Desagregação	3	3	24		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5		0		Foto do Elemento Estrutural 
Desplacamento	3	1	2,4		
Manchas	3		0		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	3	24		
Flechas			0		
Erosão	4		0		
Grau de deterioração de um elemento PSP4			38		

Tabela B.11 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTL1

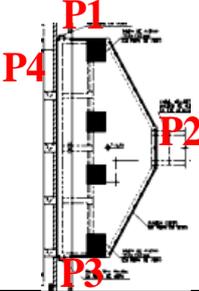
Nome do Elemento	TTL1	Dmáx	100	Croqui	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano		
Carbonatação	3		0		
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	3	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	4	100		
Desagregação	3	3	24		
Deslocamento por Empuxo			0		
Desvios de Geometria			0		
Eflorescências	2	4	40		
Falhas de Concretagem	2	0	0		Foto do Elemento Estrutural 
Fissuras	5	2	8		
Desplacamento	3	3	24		
Manchas	3	3	24		
Sinais de Esmagamento			0		
Umidade	3	2	4,8		
Flechas	5	0	0		
Erosão			0		
Grau de deterioração de um elemento TTL1			156		

Tabela B.12 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP1

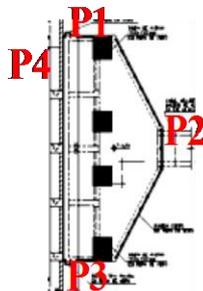
Nome do Elemento	TTP1	Dmáx	100	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	4	60	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	2	8	
Desagregação	3		0	
Deslocamento por Empuxo	5	4	100	
Desvios de Geometria	3		0	
Eflorescências	2	2	3,2	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	3	40	
Desplacamento	3	2	4,8	
Manchas	3	2	4,8	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento TTP1			156	

Tabela B.13 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP2

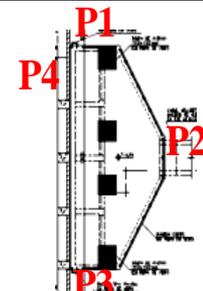
Nome do Elemento	TTP2	Dmáx	100	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	4	60	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5		0	
Desagregação	3		0	
Deslocamento por Empuxo	5	4	100	
Desvios de Geometria	3		0	
Eflorescências	2	2	3,2	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	3	40	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	2	4,8	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento TTP2			153	

Tabela B.14 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP3

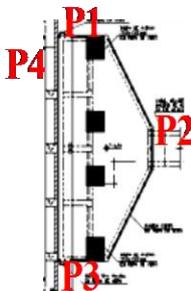
Nome do Elemento	TTP3	D _{máx}	100	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	4	60	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5		0	
Desagregação	3	3	24	
Deslocamento por Empuxo	5	4	100	
Desvios de Geometria	3		0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5		0	
Desplacamento	3		0	
Manchas	3	2	4,8	
Sinais de Esmagamento	5	4	100	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento TTP3			166	

Tabela B.15 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TTP4

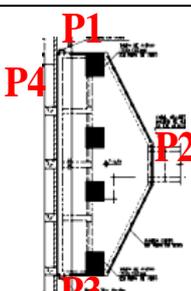
Nome do Elemento	TTP4	D _{máx}	100	Croqui	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano		
Carbonatação	3		0		
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	1	4		
Desagregação	3		0		
Deslocamento por Empuxo	5	4	100		
Desvios de Geometria	3		0		
Eflorescências	2	1	1,6		
Falhas de Concretagem	2	1	1,6		Foto do Elemento Estrutural 
Fissuras	5	1	4		
Desplacamento	3	0	0		
Manchas	3		0		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	2	4,8		
Flechas			0		
Erosão	4		0		
Grau de deterioração de um elemento TTP4			114		

Tabela B.16 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CCP1

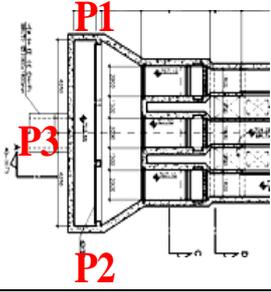
Nome do Elemento	CCP1	D _{máx}	60	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3		0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3		0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	4	60	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento CCP1			64	

Tabela B.17 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CCP2

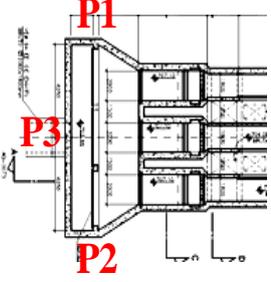
Nome do Elemento	CCP2	D _{máx}	60	Croqui	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano		
Carbonatação	3	1	2,4		
Cobrimento Deficiente	3	0	0		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	0	0		
Desagregação	3		0		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		Foto do Elemento Estrutural 
Fissuras	5	0	0		
Desplacamento	3	0	0		
Manchas	3		0		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	4	60		
Flechas			0		
Erosão	4		0		
Grau de deterioração de um elemento CCP2			62		

Tabela B.18 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CCP3

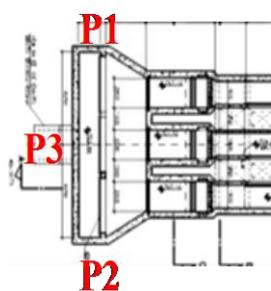
Nome do Elemento	CCP3	D _{máx}	60	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3		0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3		0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	4	60	
Flechas			0	
Erosão	4		0	
Grau de deterioração de um elemento CCP3			71	

Tabela B.19 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GFL1

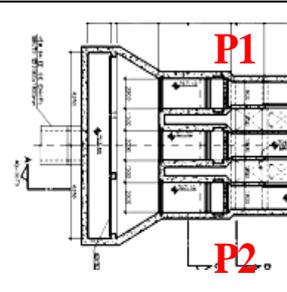
Nome do Elemento	GFL1	D _{máx}	24	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3		0	
Cobrimento Deficiente	3		0	
Contaminação por Cloretos	3	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	3	24	
Deslocamento por Empuxo			0	
Desvios de Geometria			0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	2	4,8	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento			0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas	5		0	
Erosão			0	
Grau de deterioração de um elemento GFL1			32	

Tabela B.20 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GFP1

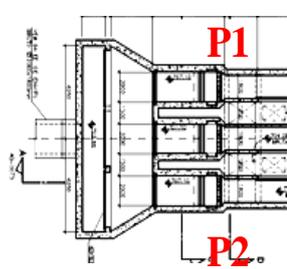
Nome do Elemento	GFP1	Dmáx	32	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	2	4,8	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4	3	32	
Grau de deterioração de um elemento GFP1			45	

Tabela B.21 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural GFP2

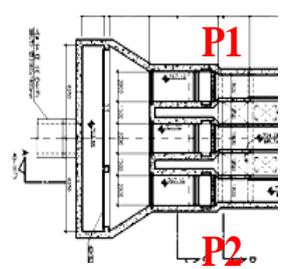
Nome do Elemento	GFP2	Dmáx	32	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	2	4,8	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4	3	32	
Grau de deterioração de um elemento P2			45	

Tabela B.22 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP1

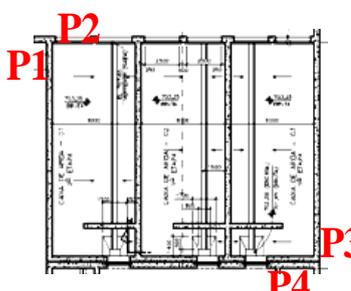
Nome do Elemento	CAP1	D _{máx}	4,8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento CAP1			8	

Tabela B.23 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP2

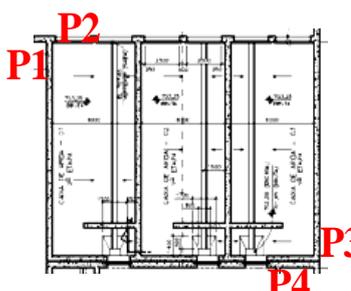
Nome do Elemento	CAP2	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4		0	
Corrosão das Armaduras	5		0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento CAP2			34	

Tabela B.24 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP3

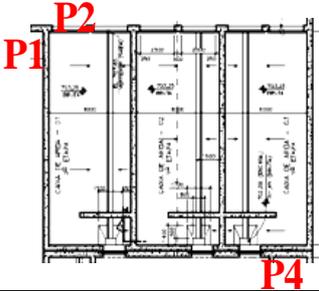
Nome do Elemento	CAP3	D _{máx}	4,8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento CAP3			8	

Tabela B.25 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CAP4

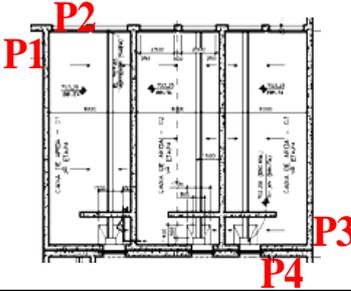
Nome do Elemento	CAP4	D _{máx}	4,8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento CAP4			8	

Tabela B.26 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPL1

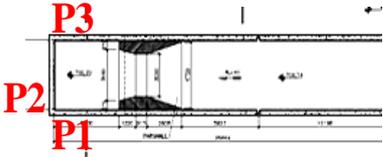
Nome do Elemento	CPL1	D _{máx}	8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3		0	
Cobrimento Deficiente	3		0	
Contaminação por Cloretos	3	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo			0	
Desvios de Geometria			0	
Eflorescências	2	2	3,2	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	2	8	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento		0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas	5	0	0	
Erosão			0	
Grau de deterioração de um elemento CPL1			12	

Tabela B.27 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPP1

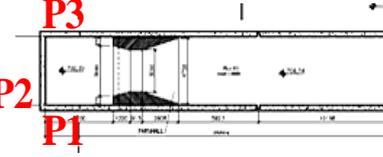
Nome do Elemento	CPP1	D _{máx}	32	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	3	32	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	2	6,4	
Grau de deterioração de um elemento CPP1			50	

Tabela B.28 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPP2

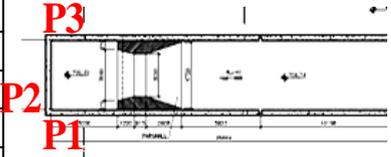
Nome do Elemento	CPP2	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento CPP2			33	

Tabela B.29 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural CPP3

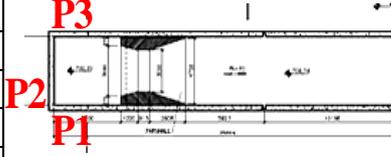
Nome do Elemento	CPP3	D _{máx}	32	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	3	32	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	2	4,8	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	2	6,4	
Grau de deterioração de um elemento CPP3			51	

Tabela B.30 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP1

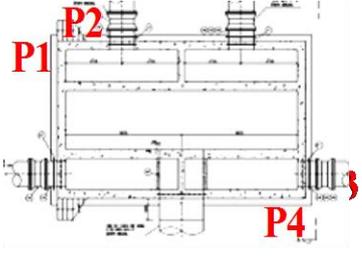
Nome do Elemento	TDP1	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TDP1			33	

Tabela B.31 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP2

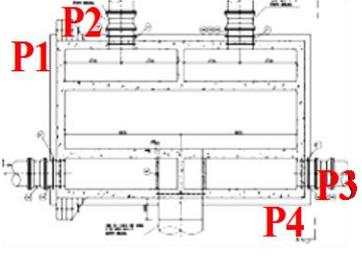
Nome do Elemento	TDP2	Fator de Intensidade	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TDP2			30	

Tabela B.32 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP3

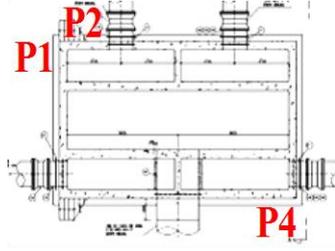
Nome do Elemento	TDP3	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TDP3			30	

Tabela B.33 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TDP4

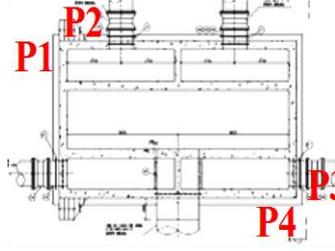
Nome do Elemento	TDP4	D _{máx}	24	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TDP4			31	

Tabela B.34 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural D1

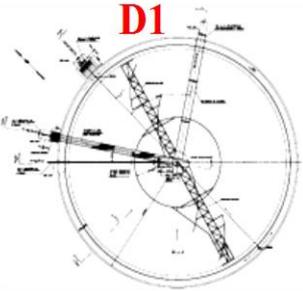
Nome do Elemento	D1	Dmáx	40		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3	1	2,4		
Cobrimento Deficiente	3	0	0		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	3	40		
Desagregação	3	0	0		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5	3	40		<p>Foto do Elemento Estrutural</p> 
Desplacamento	3	0	0		
Manchas	3	3	24		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	3	24		
Flechas			0		
Erosão	4	0	0		
Grau de deterioração de um elemento D1			68		

Tabela B.35 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural D2

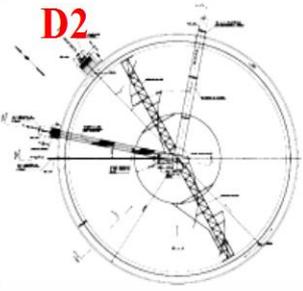
Nome do Elemento	D2	Dmáx	24		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3	1	2,4		
Cobrimento Deficiente	3	0	0		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	0	0		
Desagregação	3	0	0		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5	0	0		<p>Foto do Elemento Estrutural</p> 
Desplacamento	3	0	0		
Manchas	3	3	24		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	2	4,8		
Flechas			0		
Erosão	4	0	0		
Grau de deterioração de um elemento D2			30		

Tabela B.36 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural D3

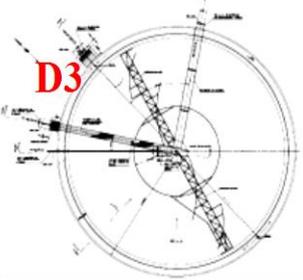
Nome do Elemento	D3	D _{máx}	24	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	2	8	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	1	1,6	
Fissuras	5	1	4	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento D3			36	

Tabela B.37 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP1

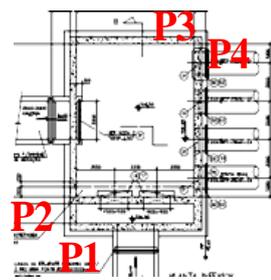
Nome do Elemento	TFP1	D _{máx}	24	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	2	4,8	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	0	0	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TFP1			30	

Tabela B.38 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP2

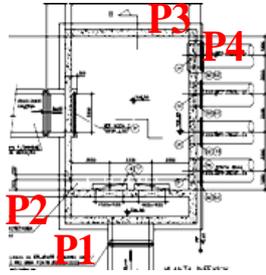
Nome do Elemento	TFP2	D _{máx}	4,8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TFP2			6	

Tabela B.39 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP3

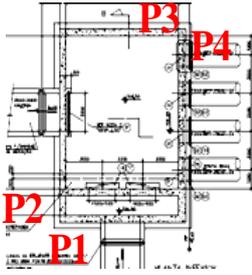
Nome do Elemento	TFP3	D _{máx}	24	Croqui	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano		
Carbonatação	3	1	2,4		
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4		
Contaminação por Cloretos	4	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	0	0		
Desagregação	3	0	0		
Deslocamento por Empuxo	5	0	0		
Desvios de Geometria	3	0	0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		Foto do Elemento Estrutural
Fissuras	5	0	0		
Desplacamento	3	0	0		
Manchas	3	3	24		
Sinais de Esmagamento	5	0	0		
Umidade	3	2	4,8		
Flechas			0		
Erosão	4	0	0		
Grau de deterioração de um elemento TFP3			31		

Tabela B.40 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TFP4

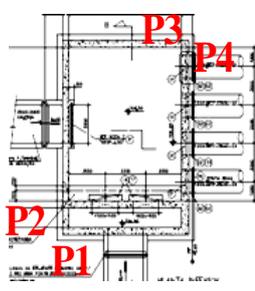
Nome do Elemento	TFP4	D _{máx}	24	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	3	24	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	
Desplacamento	3	0	0	<p>Foto do Elemento Estrutural</p> 
Manchas	3	3	24	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TFP4			38	

Tabela B.41 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLL1

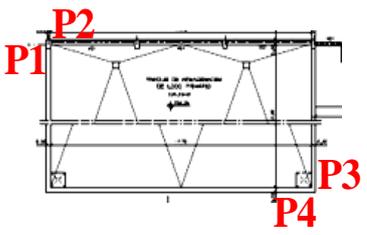
Nome do Elemento	TLL1	D _{máx}	60		
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui	
Carbonatação	3		0		
Cobrimento Deficiente	3		0		
Contaminação por Cloretos	3	0	0		
Corrosão das Armaduras	5	3	40		
Desagregação	3	4	60		
Deslocamento por Empuxo			0		
Desvios de Geometria			0		
Eflorescências	2	0	0		
Falhas de Concretagem	2	0	0		
Fissuras	5	0	0		
Desplacamento	3	0	0	<p>Foto do Elemento Estrutural</p> 	
Manchas	3	0	0		
Sinais de Esmagamento			0		
Umidade	3	0	0		
Flechas	5	0	0		
Erosão			0		
Grau de deterioração de um elemento TLL1			84		

Tabela B.42- Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP1

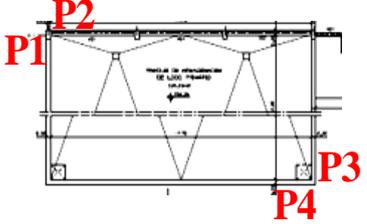
Nome do Elemento	TLP1	Dmáx	8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	1	2,4	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5		0	
Desagregação	3		0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	2	3,2	
Falhas de Concretagem	2	1	1,6	
Fissuras	5	2	8	Foto do Elemento Estrutural
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	2	4,8	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	2	4,8	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TLP1			13	

Tabela B.43 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP2

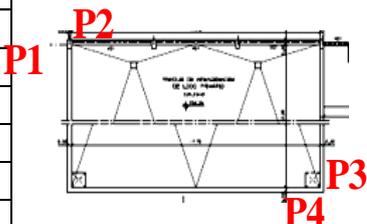
Nome do Elemento	TLP2	Dmáx	4,8	Croqui
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	
Carbonatação	3	2	4,8	
Cobrimento Deficiente	3	0	0	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5		0	
Desagregação	3		0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	1	4	Foto do Elemento Estrutural
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TLP2			8	

Tabela B.44 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP3

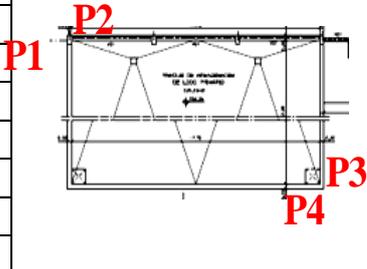
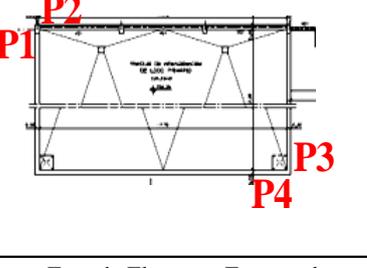
Nome do Elemento	TLP3	D _{máx}	24	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	3	24	
Cobrimento Deficiente	3	1	2,4	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	0	0	
Desagregação	3	0	0	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	Foto do Elemento Estrutural
Desplacamento	3	0	0	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TLP3			28	

Tabela B.45 - Ficha de Avaliação do elemento estrutural TLP4

Nome do Elemento	TLP4	D _{máx}	60	
Manifestação Patológica	Fator de Ponderação	Fator de Intensidade	Dano	Croqui
Carbonatação	3	3	24	
Cobrimento Deficiente	3	3	24	
Contaminação por Cloretos	4	0	0	
Corrosão das Armaduras	5	3	40	
Desagregação	3	4	60	
Deslocamento por Empuxo	5	0	0	
Desvios de Geometria	3	0	0	
Eflorescências	2	0	0	
Falhas de Concretagem	2	0	0	
Fissuras	5	0	0	Foto do Elemento Estrutural
Desplacamento	3	4	60	
Manchas	3	0	0	
Sinais de Esmagamento	5	0	0	
Umidade	3	1	2,4	
Flechas			0	
Erosão	4	0	0	
Grau de deterioração de um elemento TLP4			103	