

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
DIRETORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

SAMANTHA FERNANDA BENDER

**ESTUDO DA DURABILIDADE DO CONCRETO FRENTE À
DEGRADAÇÃO COM ATAQUE DE SULFATOS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)**

São Leopoldo

2025

SAMANTHA FERNANDA BENDER

**ESTUDO DA DURABILIDADE DO CONCRETO FRENTE À
DEGRADAÇÃO COM ATAQUE DE SULFATOS EM ESTAÇÕES DE
TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Christ

São Leopoldo

2025

B458e Bender, Samantha Fernanda.

Estudo da durabilidade do concreto frente à degradação com ataque de sulfatos em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) / Samantha Fernanda Bender. – 2025.

112 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

“Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Stumpf González
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Christ”.

1. Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). 2. Durabilidade. 3. Sulfato. 4. Ataque. 5. Amostras. I. Título.

CDD 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster Ditbenner – CRB 10/2517)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CTIE), professores, familiares e colegas.

RESUMO

O tempo de recorrência estabelecido na NBR 8681:2003 para durabilidade de estruturas de concreto é de 50 anos. Espera-se que as estruturas em concreto não apresentem problemas ou patologia dentro desse intervalo. Nesta pesquisa, a durabilidade e a degradação do concreto são abordadas pela relevância e pela necessidade de cuidados especiais em meios agressivos como em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), que apresentam dificuldades para desenvolver o tratamento para o concreto com patologia oriunda do ataque por sulfatos. O objetivo deste estudo é avaliar a durabilidade de estações de tratamento de esgoto, realizando inspeção, diagnóstico das anomalias e relatar a terapia das mesmas. Dentro desse contexto, para a análise e metodologia aplicada neste estudo, foram realizadas inspeções “in loco” em dez ETEs e coletas de amostras em uma ETE para o esgoto e do concreto dentro do tanque no qual posteriormente foram realizados os ensaios. Os ensaios realizados seguiram o procedimento da NBR 16937 – Águas agressivas – Durabilidade do Concreto Parte 6 com a coleta de esgoto e o Ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) para constatação da degradação com presença de sulfato com a coleta de amostra da parede interna de um tanque em ETE. Além das amostras coletadas, para determinar a análise de dados, foi necessário realizar uma comparação com outros padrões pesquisados com relação das características químicas do esgoto da ETE. O resultado da amostra de esgoto coletada em junho de 2024 foi $SO_4^{-2} = 181,10$ mg/l. E o resultado da coleta em outubro de 2024 apresentou o valor encontrado para o estudo, $SO_4^{-2} = 211,97$ mg/l. Sobre a análise amostras de concreto, coletadas na parede interna do tanque de tratamento, foram analisadas através do FRX, resulta em que as cinco amostras são formadas basicamente por dois componentes, $SiO_2 = 41,517\%$ e $CaO = 10,712\%$ no ponto de profundidade em 3,00 centímetros e de metais alcalinos-terrosos 6,357% (MgO) durante a coleta das amostras. Apresentou também no ponto em 3,00 centímetros uma baixa concentração em óxidos de metais (Na₂O e K₂O) e alumínio (Al₂O₃). Após a análise dos resultados foi possível constatar a intensidade da ação de degradação do concreto em ETE frente ao ataque de sulfatos.

Palavras-chave: ETE; durabilidade; sulfato; ataque, amostras.

ABSTRACT

The recurrence time established in NBR 8681:2003 for the durability of concrete structures is 50 years. It is expected that concrete structures will not present problems or pathologies within this interval. In this research, the durability and degradation of concrete are addressed due to their relevance and the need for special care in aggressive environments such as Sewage Treatment Plants (ETEs), which have difficulties in developing treatments for concrete with pathologies resulting from sulfate attack. The objective of this study is to evaluate the durability of sewage treatment plants, carrying out inspections, diagnosing anomalies and reporting on their treatment. Within this context, for the analysis and methodology applied in this study, "on-site" inspections were carried out in ten ETEs and samples were collected in one ETE for the sewage and concrete inside the tank in which the tests were subsequently carried out followed The test out followed the produce of NBR 16937 – Aggressive Waters – Durability of Concrete Part 6 with the collection of sewage and the X-ray Fluorescence Test (FRX) to verify degradation with the presence of sulfate with the collection of a sample from the internal wall of a tank in ETE sewage. In addition to the samples collected, to determine the data analysis, it was necessary to carry out a comparison with other researched standards regarding the chemical characteristics of the ETE sewage. The result of the sewage sample collected in June 2024 was $\text{SO}_4^{-2} = 181.10 \text{ mg/l}$. And the result of the collection in October 2024 presented the value found for the study $\text{SO}_4^{-2} = 211.97 \text{ mg/l}$. Regarding the analysis, concrete samples, collected on the inner wall of the treatment tank, were analyzed through FRX, resulting in that the five samples are basically formed by two components, $\text{SiO}_2 = 41.517\%$ and $\text{CaO} = 10.712\%$ at the depth point at 3.00 cm and alkaline earth metals 6.357% (MgO) during sample collection. It also presented at the point 3.00 centimeters a low concentration of metal oxides (Na_2O and K_2O) and aluminum (Al_2O_3). After analyzing the results, it was possible to verify the intensity of the concrete degradation action in ETE in the face of sulfate attack.

Keywords: ETE, durability, sulfate, attack, sample.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual da população atendida e índice de tratamento de dados de saneamento.....	18
Figura 2 - Dados regionais sobre saneamento em Cachoeirinha – RS.....	18
Figura 3 - Trabalhos científicos na base de dados ScienceDirect no período de 2004-2023 sobre a durabilidade do concreto.....	23
Figura 4 - Velocidade de descamação do concreto.....	25
Figura 5 - Manifestações patológicas típicas em ETEs.....	45
Figura 6 - Formação de etringita: (a) Estrutura cristalizada da etringita e (b) imagem com microscópio de cristais de etringita.....	52
Figura 7 - Exemplo de fissuração por DEF.....	52
Figura 8 - Rede de fissuras de um pilar de ponte em contato com a água pela formação de etringita tardia.....	54
Figura 9 - Rede de fissuras no concreto da ETE Chico Mendes em contato com esgoto pela formação de etringita tardia.....	55
Figura 10 - ETA de Taiapuêba, visão dos vazamentos ocorridos por fissuração....	55
Figura 11 - Exemplos de estruturas de concreto.....	55
Figura 12 - Tanque na ETE Chico Mendes, durante processo de recuperação da estrutura.....	60
Figura 13 - Marcação de pontos de vazamentos na ETE Chico Mendes, durante processo de recuperação da estrutura ainda com vazamentos.....	61
Figura 14 - Fotografia fora do tanque na ETE Chico Mendes, durante processo de impermeabilização da última camada.....	62
Figura 15 - Coleta da amostra de esgoto doméstico na primeira semana de junho/2024.....	70
Figura 16 - Fotografia da amostra sendo ensaiada no laboratório de saneamento...	71
Figura 17 - Fotografia dentro taque no local da coleta da amostra.....	72
Figura 18 - Fotografia durante a coleta de amostras de cimento dentro do poço da ETE Alvorada.....	73
Figura 19 - Quantificação da concentração de sulfatos em amostra de esgoto.....	77
Figura 20 - Parede da ETE Ponta da Figueira.....	89
Figura 21 - Parede do tanque da ETE Ilhas Park.....	90
Figura 22 - Parede do tanque da ETE Jardim dos Lagos.....	90

Figura 23 - Parede do tanque da ETE Guaíba.....	91
Figura 24 - Parede do tanque da ETE Centro Novo.....	92
Figura 25 - Parede do tanque da ETE Chico Mendes.....	94
Figura 26 - Parede do tanque da ETE Mato Grande.....	94
Figura 27 - Parede do tanque da ETE Esteio.....	95
Figura 28 - Parede do tanque da ETE Alvorada.....	95
Figura 29 - Parede do tanque da ETE Breno Garcia.....	96
Figura 30 - Fotografia fora do tanque da ETE Chico Mendes antes e depois a da terapia.....	98
Figura 31 - Fotografia dentro do tanque da ETE Chico Mendes durante a da terapia	98
Figura 32 - Fotografia dentro do tanque da ETE Chico Mendes durante a impermeabilização.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de vida útil do concreto em ETE.....	24
Tabela 2 - Concentração de constituintes químicos presentes no esgoto e não tratados - citados por Metcalf e Eddy (2003).....	28
Tabela 3 - Características químicas de esgoto doméstico.....	30
Tabela 4 - Curva padrão ou de referência para determinação colorimétrica da DQO, segundo o método oficial das APHA, AWWA, WPCF (Greenberg <i>et al.</i> , 1992): aquecimento a 140°C - 150°C em frascos fechados.....	30
Tabela 5 - Resumo da concentração de sulfato em esgotos domésticos.....	33
Tabela 6 - Faixas de variação das concentrações de sulfeto para efluentes e reatores UASB tratando esgotos domésticos.....	33
Tabela 7 - 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).....	34
Tabela 8 - Classificação da agressividade ambiental.....	38
Tabela 9 - Agressividade do esgoto em relação ao concreto.....	46
Tabela 10 - Principais mecanismos de deterioração do concreto armado.....	56
Tabela 11 - Resumo de dados das ETEs pré- cadastradas.....	65
Tabela 12 - Ensaio realizado durante a execução da ETE de controle de moldagem, cura e ruptura – corpos de prova.....	66
Tabela 13 – Dados operacionais de ETEs estudadas com informações técnicas.....	68
Tabela 14 - Classificação da agressividade do meio ambiente em função da concentração de íon de sulfato presente no solo ou na água e algumas normas.....	79
Tabela 15 - Elementos presentes na amostra no ensaio FRX.....	83
Tabela 16 - Características químicas esgoto doméstico da ETE Alvorada.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA).....	19
Quadro 2 - Prescrições para elaboração e apresentação de estudos e projeto básico estrutural.....	39
Quadro 3 - Fatores determinantes da corrosão em concretos.....	44

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Corsan	Companhia Riograndense de Saneamento
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
NBR	Norma Brasileira Registrada
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
pH	Potencial hidrogeniônico
ppm	Partes por milhão
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

LISTA DE SÍMBOLOS

$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$

Aluminato tricálcico do cimento hidratado

C_3A

Aluminato tricálcico do cimento hidratado
designação simplificada

$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{CaSO}_4)_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$

Etringita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA DA PESQUISA.....	14
1.2	PROBLEMA.....	15
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo geral.....	16
1.3.2	Objetivos específicos.....	16
1.4	JUSTIFICATIVA.....	16
1.5	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	20
1.6	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	21
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	23
2.1	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	23
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO MEIO QUÍMICO EM ETEs.....	27
2.3	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ETEs.....	33
2.4	CARACTERÍSTICAS DOS EFLUENTES DE ETEs.....	37
2.5	CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO DE ETEs.....	41
2.6	PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ETEs.....	44
2.7	DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS EM CONCRETO DE ETEs.....	48
2.8	TRATAMENTO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ETEs.....	57
3	METODOLOGIA.....	63
3.1	DESCRIÇÃO TÉCNICA DAS ETEs.....	63
3.2	COLETA DE AMOSTRAS.....	69
3.2.1	Coleta de amostra para o método NBR 16937-6 (ABNT, 2021b).....	69
3.2.2	Coleta de amostra para Raios-X (FRX).....	71
3.3	VALORES PARA COMPARAÇÃO PESQUISADOS PARA AVALIAÇÃO DE DADOS COLETADOS.....	74
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	77
4.1	RESULTADOS.....	77
4.1.1	Resultados através da amostra para o método NBR 16937-6 (ABNT, 2021).....	77
4.1.2	Análise de resultados na Coleta de amostra para Raios-X (FRX) amostras para Raios X (FRX).....	80
4.1.3	Inspeção visual.....	87

4.1.4	Apresentação dos resultados.....	96
4.1.5	Recomendações de terapias em tanques.....	97
4.2	DISPOSIÇÕES FINAIS SOBRE À ANÁLISE DE DADOS	97
5	CONCLUSÕES.....	103
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	105
	REFERÊNCIAS.....	107

1 INTRODUÇÃO

O tempo de recorrência estabelecido na NBR 8681:2003 para durabilidade de estruturas de concreto é de 50 anos. Espera-se que as estruturas em concreto não apresentem problemas ou patologia dentro desse intervalo. A NBR 6118:2023 estabelece os valores mínimos de acordo com a classe de agressividade ambiental, visando garantir que os agentes agressivos tenham maior dificuldade em penetrar o concreto e atingir a armadura. Esta é a questão com relação à presença de degradação do concreto versus à durabilidade, e muitas vezes são descuidados na execução e na manutenção, com diversas consequências. As estruturas de concreto devem ser construídas conforme o projeto, e devem conservar segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil. Isso significa que, estruturas em concreto não deveriam apresentar problemas ou algum tipo de patologia dentro deste prazo (ABNT, NBR 6118:2023). Porém não é raro que a manifestação patológica acometa a estrutura, bem como a matéria prima das estruturas em concreto, antes desse período, inclusive ainda na fase antes da entrega da obra. Conforme Filgueiras e Xavier (2023), dentre os problemas comuns existem, por exemplo, fissuras, infiltração, desagregação do concreto, corrosão das armaduras, desintegração do concreto por presença de sulfatos e expansão.

Em função desses problemas, há necessidade de estudar manifestações patológicas e a degradação precoce que são visualizadas nas estruturas em concreto. Em um mercado construtivo cada vez mais competitivo, maiores exigências na indústria da construção civil visando à durabilidade das edificações. Este é o caso de estruturas em concreto de obras de infraestrutura, como uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), quando ainda em fase de teste sofrem ataques por sulfatos e outros compostos químicos quando o concreto não se encontra estanque, ou seja, quando em contato com esgoto. Conforme Filgueiras e Xavier (2023), agentes em contato direto com estruturas das estações, combinados aos ciclos de molhagem e secagem, tem potencial para desenvolver diversas manifestações patológicas. No estudo dos diversos processos de degradação se pode estabelecer que o esgoto é o principal agente de degradação das estruturas em concreto, pois é o veículo de transporte principal dos íons agressivos e sua movimentação é através da estrutura de concreto e pode ter efeitos deletérios.

Ainda com relação aos efeitos deletérios, presentes nesses ambientes, de acordo com Assis e Real (2023), devido à incidência dessa degradação nos sistemas de tratamento de esgoto e dos efeitos expressivos de sua agressividade, o desenvolvimento de pesquisas focadas em atender os mecanismos de deterioração. Em virtude disso, há um nicho e a oportunidade para o desenvolvimento de estudos.

1.1 TEMA DA PESQUISA

Como tema dessa pesquisa foram abordadas as estruturas de concreto, quando expostas em ambientes agressivos, como no caso das ETEs. As ETEs são obras de infraestrutura no saneamento que são importantes para o tratamento de esgoto e são objeto da pesquisa nesse estudo. Nesse sentido, de acordo com Assis e Real (2023) o novo marco legal do saneamento básico aprovado no Brasil pode levar a um aumento na infraestrutura para tratamento no país. Na avaliação de elementos construtivos em concreto nas ETEs é possível verificar a ação da degradação nos tanques de tratamento. Essa ação de degradação nas paredes dos tanques de tratamento se trata de uma patologia que são problemas que afetam tal estrutura.

Conforme Filgueiras e Xavier (2023), a patologia das edificações é o ramo da engenharia responsável pelo estudo das causas e problemas nas estruturas, enquanto a manifestação patológica é a expressão desses problemas encontrados nas edificações. Quando surge uma patologia, pode-se verificar infiltrações no elemento construtivo, e surgem manchas de umidade, sendo esses os primeiros sintomas que exigem atenção.

Em virtude desse fato, é necessário ressaltar a importância do projeto executivo, que conforme Leifert (2023), que relata casos na Sabesp, sobre os dimensionamentos das estruturas, onde deve ser observado o diâmetro do agregado em função do consumo do cimento, pois há uma relação no calor de hidratação, que pode ser reverter em aumento de retração e isso deve ser observado na fase de projeto. Com relação à durabilidade pode-se dizer que está dividida em parâmetros ligados ao material, parâmetros ligados ao ambiente e parâmetros ligados à estrutura. O parâmetro ligado ao material está relacionado com a composição

química e mineralógica do cimento, o teor de portlandita,¹ frente aos ataques químicos que podem ocorrer estando em carga e também frente à ação de degradação de sulfatos. Dentro dos parâmetros ligados ao ambiente que são significativos os de natureza química do agente agressivo, sendo líquido de condução de esgoto que está em tratamento em tanques de ETEs. Nesse ponto em questão que ocorre a ação de degradação do concreto que compromete a sua durabilidade e é o objeto de estudo.

1.2 PROBLEMA

Dentro deste contexto, o problema abordado busca contribuir para o conhecimento sobre degradação do concreto e a sua durabilidade em estruturas de concreto em ETEs com presença de ataques de sulfatos. Sobre esse assunto de acordo com Dias *et al.* (2023), a durabilidade do concreto está relacionada com as condições ambientais às quais as estruturas estarão expostas.

Ainda frente ao assunto quando se trata da durabilidade de uma estrutura, se trata da capacidade do concreto de resistir a ações adversas. Com isso, para que o concreto mantenha a vida útil de projeto e a sua durabilidade, se fez necessário que conserve sua forma original, qualidade e capacidade de utilização. Ressaltando também que são importantes as condições ambientais de exposição e a sua confiabilidade em satisfazer as exigências estabelecidas e que estejam relacionadas com o dimensionamento da estrutura e com esses aspectos influenciam diretamente na vida útil do projeto. Enfatizando a importância da relação às exigências de durabilidade na NBR 6118:2023:

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, de acordo com o que estabelece a ABNT NBR 6118, apresentem segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil de projeto. (NBR:12655:2022).

¹ Diferença entre a quantidade total de portlandita determinada pela termogravimetria (TG) e a quantidade de portlandita presente na pasta antes do início da hidratação. O valor é expresso em gramas de cimento.

Por conseguinte, ainda sobre a questão da durabilidade e a exposição a um ambiente agressivo pode-se afirmar que há necessidade de estudo frente a demanda da execução de ETEs no Brasil, conforme Gobbi *et al.* (2023).

Conforme Gobbi *et al.* (2023), no Brasil, apesar de 80,80 % do esgoto coletado ser tratado, menos da metade da população em quase todas as regiões do país é atendida pelo serviço de tratamento de esgoto. Em virtude da necessidade de tratamento de esgoto e as estruturas em concreto das ETEs ainda estão expostas em um ambiente muito agressivo, tornando um problema. Onde com exceção do Sudeste e Centro-oeste, as demais regiões atendem menos da metade da demanda necessária. Quanto ao problema, é possível verificar que há manifestação de patológica no concreto em ETEs frente a um ataque em meio agressivo. Também é possível verificar situações com essa demanda em ETEs padrão Corsan e de dados consultados no site da Corsan com os locais dessa demanda nos municípios do Rio Grande do Sul, RS disponível em <https://www.corsan.com.br/quem-somos> (Corsan, 2024).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do trabalho é avaliar a degradação e durabilidade de tanques em concreto de estações de tratamento de esgoto, realizando inspeção, diagnóstico das anomalias e relatar a terapia das mesmas.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Comparar as manifestações patológicas encontradas nas ETEs;
- b) Comparar os diferentes parâmetros de esgotos em ETE;
- c) Analisar os resultados e propor soluções para mitigar os efeitos dos ataques químicos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Em função de problemas de manifestação patológica e degradação precoce visualizados nas estruturas em concreto, bem como, em um mercado construtivo cada vez mais competitivo, maiores exigências na indústria da construção civil visando à durabilidade das edificações. Este é o caso de estruturas em concreto de obras de infraestrutura, como a ETE – Estação de Tratamento de Esgoto, quando ainda em fase de testes sofrem ataques de sulfatos e químicos quando o concreto se encontra em contato com esgoto.

Com relação a manifestação patológica nas ETEs de acordo com Filgueiras e Xavier (2023), observa-se que em sistemas submetidos a uma agressividade física, química e biológica, é necessário realizar de forma adequada as etapas de concepção, execução e manutenção e demais sistemas ligados ao saneamento. Também relata sobre um projeto bem desenvolvido, seguindo parâmetros e normas para diminuir perdas físicas e financeiras longe de imprevistos. Pode-se constatar que através das leituras pesquisadas, a degradação por ataque por sulfato ocorreu diante da relação água/cimento do projeto executivo, processo executivo e também pela permeabilidade do concreto, quando os tanques foram postos em testes.

Diante do exposto, pode-se entender que o ataque de sulfatos tem ação direta com a degradação da pasta do cimento, bem como quanto à durabilidade do concreto em contato com esgoto. A degradação da pasta de cimento ocorre através de diversas reações químicas e processos físicos, como carbonatação, ataque de sulfatos, ataque de ácidos e exposição a altas temperaturas. Esses processos podem alterar a estrutura e as propriedades da pasta, reduzindo a sua resistência e durabilidade.

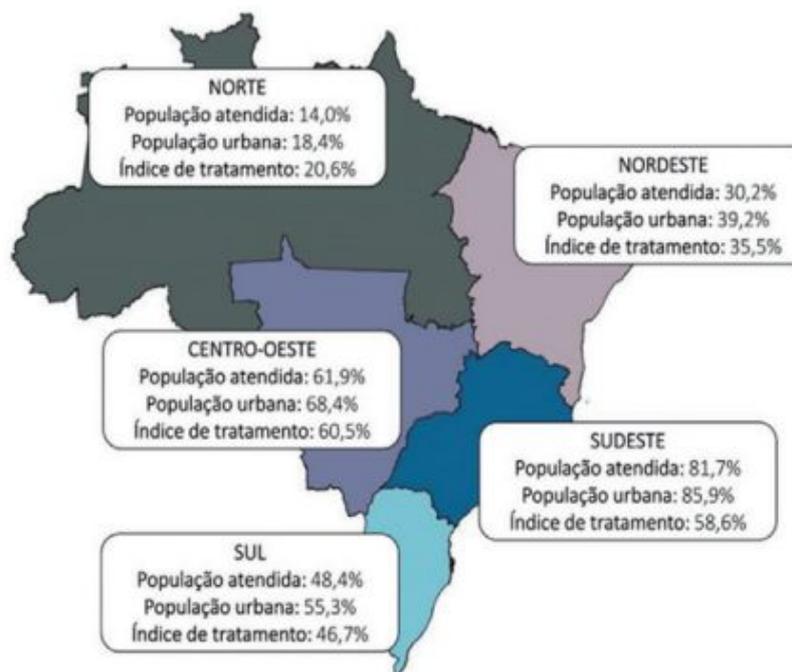
A fim de minimizar os efeitos ainda sobre a questão do ataque no concreto em ETEs (Gobbi *et al.*, 2023):

Embora a legislação brasileira tenha estabelecido metas para melhorar a água potável e aumentar a coleta e tratamento de esgoto, ainda é necessário investir em estudos para compreender melhor os efeitos da degradação do concreto e desenvolver formas de mitigação. (Gobbi *et al.*, 2023).

Ainda relacionando a necessidade da pesquisa com as obras de infraestrutura como as ETEs, pois estão relacionadas aos serviços básicos e essenciais para a sociedade e observa-se que do total de esgoto coletado corresponde 4,9 bilhões de m³. A população atendida por região com rede pública de esgoto é observada na

Figura 1. Na região Sul do Brasil, o percentual é de 48,40%, justificando a necessidade de estudos para o tema proposto.

Figura 1 - Percentual da população atendida e índice de tratamento de dados de saneamento



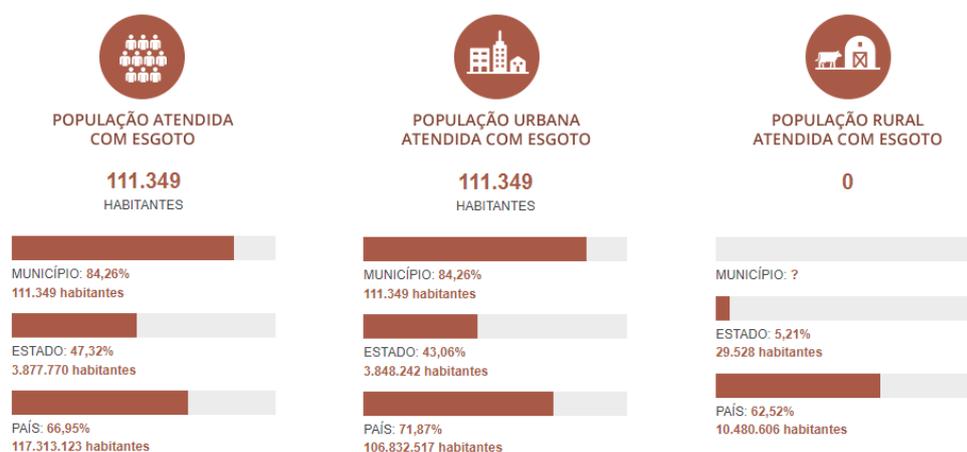
Fonte: Adaptado de Gobbi *et al.* (2023).

Também sobre a situação do saneamento, há necessidade e oportunidade de estudo regional conforme os dados da Figura 2, fornecidos no site da Corsan.

Figura 2 - Dados regionais sobre saneamento em Cachoeirinha – RS

ACESSO

84,26% da população total de CACHOEIRINHA tem acesso aos serviços de esgotamento sanitário. A média do estado do Rio Grande do Sul é 47,32% e, do país, 66,95%.



Fonte: Corsan (2024).

Ainda com relação estrutura de concreto em ETEs com digestão anaeróbica (Gobbi et al. 2023):

As estruturas de concreto expostas ao ambiente de estações de tratamento de esgoto (ETE), especialmente aquelas que utilizam a digestão anaeróbica, são submetidas ao microclima com concentrações elevadas de ácido sulfúrico biogênico (H₂ SO₄). Conforme a norma NBR 6118:2014, o ambiente de ETE é classificado como classe IV, com risco elevado de deterioração das estruturas. (Gobbi et al., 2023).

Há também uma necessidade de verificação da classificação quanto ao ambiente e a agressividade, conforme o Quadro 1 (NBR 6118:2023). Sendo que com relação ao risco de deterioração da estrutura projetada e sua durabilidade está inserida ao um meio com agressividade moderada para o meio urbano que são os casos de estruturas em concreto dos tanques de tratamento das ETEs.

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande

		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	
a	Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).		
b	Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras e regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.		
c	Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com o solo contaminado ou água subterrânea contaminada.		

Fonte: Tabela 6.1, NBR 6118:2023.

Quanto ao assunto do estudo, que trata da deterioração de materiais presentes na composição do concreto frente à ação de degradação do esgoto em contato nas paredes de tanques de concreto, ou seja, da estrutura em carga: “Quando a estação foi colocada em carga, em 1973, os decantadores de concreto começaram a apresentar pequenos vazamentos em muitos pontos” (Ferreira, 2023).

Quanto à questão da durabilidade frente à ação de degradação, para o caso dessa abordagem de estudo com ataque químico, sulfatos e quando há formação de etringita no concreto em condições específicas:

Os parâmetros determinantes são os seguintes:

- Parâmetros relacionados ao aquecimento do concreto;
- Parâmetros relacionados à composição química do concreto e do cimento;
- Parâmetros relacionados à dosagem do concreto;
- Parâmetros relacionados ao ambiente da estrutura, conforme (Carles-Gibergues; Hornain, 2014).

Por fim, tendo como base as leituras realizadas, com embasamento teórico, posteriormente visitas “in loco”, coleta de amostras e realização de análises foi possível verificar a necessidade de estudo na questão proposta.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo aborda a durabilidade frente à ação de degradação do ataque de sulfatos em estruturas em concreto de ETE, que ocasionam manifestações patológicas. Aborda também a verificação dos ataques ao concreto com inspeções “in loco” de dez ETEs padrão Corsan no Rio Grande do Sul, sendo destas, sete ETEs com dados de projeto padrão Corsan. Em virtude disso, a delimitação do tema se restringe em sete ETEs selecionadas com padrão de projeto Corsan, abordado e analisado o concreto dos tanques com ação de degradação. Porém todas as dez ETEs terão suas características descritas.

Dentro da delimitação do tema dessas sete ETEs, apenas uma foi possível o acesso dentro do tanque de tratamento de esgoto para a coleta e análise da ação de degradação do concreto. Sobre essa ação de degradação no concreto teria a possibilidade da análise dos dados, proposta de soluções e verificação da possibilidade de amenizar a agressividade da ação sobre o concreto. Ainda com relação à delimitação ao tema proposto, se faz necessária a verificação de dados de projeto e acesso aos dados, determinação do local e devido acesso e do elemento analisado para que ocorra posteriormente a coleta de amostras para análise. Para continuidade do estudo também foi necessária à coleta de dados de projeto e nesse caso a Corsan possui um padrão de projeto com detalhes executivos no projeto estrutural. Esse fator de acesso aos dados de projeto foi um fator excludente entre as ETEs, assim como a idade de construção, estar em operação e não sofrer desativação. Posteriormente foi selecionada uma ETE onde foi possível coletar amostras dentro da parede do tanque. Nesse caso específico das ETEs, é necessário ressaltar que as ETEs estão em funcionamento, ou seja, estão em carga, tratando o esgoto. Porém, durante as verificações dessas sete ETEs, uma somente estava com o tanque vazio e isso possibilitou o acesso dentro da estrutura para retirada de amostras para análise de dados e do padrão construtivo dessa estrutura. Sobre o padrão construtivo dessas estruturas, é necessário relatar o padrão Corsan em projetos, sobre casos em comum bem como dados coletados para análise de resultados.

Para viabilizar o estudo, uma dessas estruturas em concreto foi coletado amostras. Com isso o estudo prosseguirá avaliando os dados das amostras coletadas, que serão de esgoto e de uma parede em concreto de um tanque, na

parte interna para verificação da degradação somente do concreto. Sobre esse aspecto, a única ETE disponível para a realização de coleta de amostras “in loco” e com acesso na parte interna, ou seja, dentro do tanque em concreto é a ETE Alvorada. Todas as outras ETEs estavam em carga, impossibilitando o acesso e a coleta de amostras. Ressaltando também que todas as ETEs selecionadas serão apresentadas sobre o aspecto necessário nesse estudo.

1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

Sobre a dissertação, a mesma foi disposta em capítulos.

O primeiro capítulo é relativo à introdução e justificativa do tema, definição do problema e dos objetivos e o tema.

No segundo capítulo, foi realizada uma revisão da literatura para embasamento teórico do assunto estudado.

Já no terceiro capítulo foi apresentada a metodologia da pesquisa, explicando como os dados foram coletados e o tipo de análise realizado. No quarto capítulo os resultados dos ensaios e vistorias, são apresentados e analisados, e no quinto apresenta-se as conclusões.

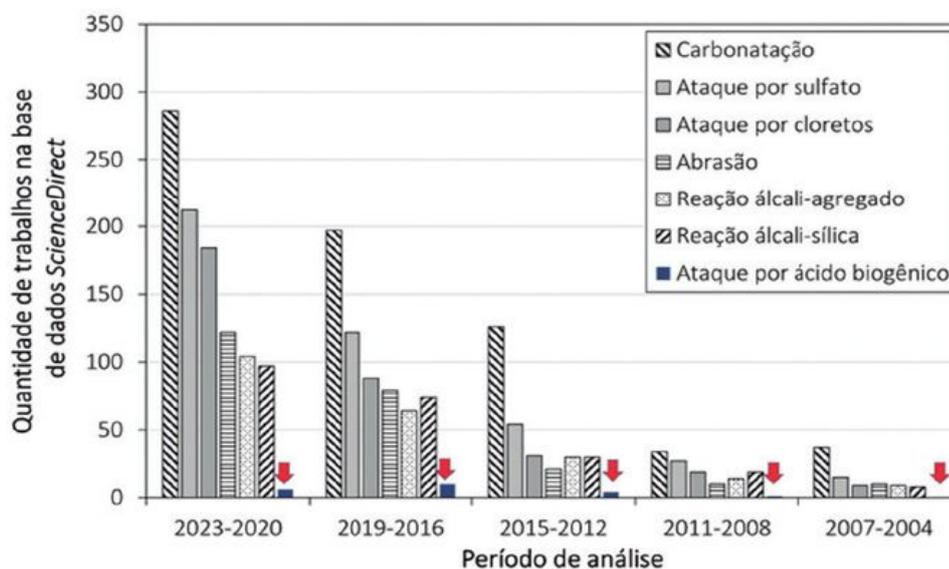
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Para embasamento desse estudo foi necessária a ação da seleção de um referencial teórico e posterior comparação desses elementos.

2.1 EMBASAMENTO TEÓRICO

Para embasar a pesquisa foi utilizada para fundamentação o uso de artigos do Scielo, artigos do IBRACON, revistas, livros e outros como fontes confiáveis. A parte técnica da contextualização foi baseada em ABNT em contraponto com todo o desenvolvimento da pesquisa. Também pode-se utilizar dados de busca nessa pesquisa como por exemplo de acordo com Gobbi *et al.* (2023), em relação aos estudos na área de durabilidade do concreto, conforme revisão sistemática realizada na base de dados da base ScienceDirect do período 2004-2023, em comparação a outros tipos de ataques na Figura 3. A Figura 3 também destaca dados com relação quanto à quantidade de trabalhos desenvolvidos sobre a durabilidade, detalhando os tipos de ataques onde percebe-se a coluna referente ao ataque por sulfatos como área de interesse de estudo nessa pesquisa.

Figura 3 - Trabalhos científicos na base de dados ScienceDirect no período de 2004-2023 sobre a durabilidade do concreto



Fonte: Gobbi *et al.* (2023).

Com relação ao tema da pesquisa, tem se observado cada vez mais a existência de estruturas de concreto armado em estado alterado por processos de deterioração. Fato que induz a incerteza quanto à sua segurança e estabilidade. Tal situação, em muitos casos, é motivada pelo desconhecimento dos processos e mecanismos de degradação. Bem como pela ausência de ensaios que possam apreciar, avaliar e estimar com propriedade a durabilidade dos concretos. Uma vez que os requisitos de controle e avaliação, normalizados ou não, continuam sendo a quantidade de cimento utilizado na produção dos concretos e a relação água/cimento. Para tal, se faz necessária a busca e análise de elementos com confiabilidade e eficiência para a avaliação da durabilidade dos concretos em estruturas. Elencando dados para a busca de análise e elementos, visto por Gobbi *et al.* (2023) na Tabela 1 considera o tempo de vida útil das estruturas de concreto de ETEs, é o tempo que atinge as armaduras. A Tabela 1 mostra a velocidade de degradação do concreto em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) no Brasil, com valores que variam entre 0,84 a 6,60 mm/ano, dependendo da condição de inspeção ou ensaio. A inspeção em ETEs resultou em valores de 0,84 a 1,20 mm/ano, enquanto corpos de prova submetidos a uma ETE mostraram velocidades de 1,20 a 6,60 mm/ano. Sendo assim a Tabela 1 ilustra que esse tempo é menor de

10 anos para a degradação dos materiais para o caso da maior velocidade. Já para a menor velocidade, a Figura 4 ilustra a vida útil de 50 anos para a degradação.

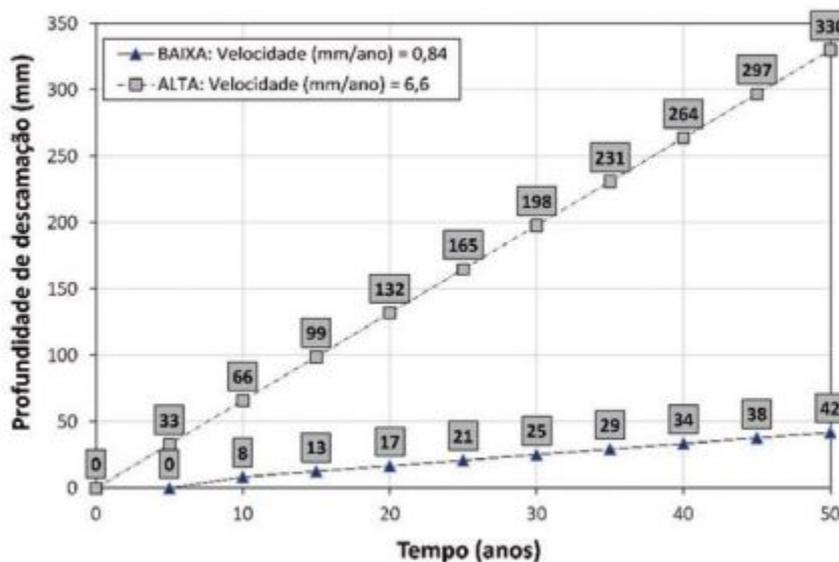
Tabela 1 - Tempo de vida útil do concreto em ETE

País	Velocidade (mm/ano)	Condição	Referência bibliográfica
Brasil	0,84 - 1,20	Inspeção em ETE Corpos de prova submetidos a uma ETE	Cardoso e Anjos (2022)
Brasil	1,20 - 6,60		Godinho e Medeiros (2022)

Fonte: Gobbi *et al.* (2023).

A Figura 4 evidencia que a velocidade do processo de descamação progressiva do concreto apresenta velocidade linear ao longo dos anos. Sendo que a descamação é um processo complexo influenciado por diversos fatores, e a velocidade com que ocorre varia ao longo do tempo e em diferentes contextos. A velocidade da descamação é influenciada por fatores como a qualidade do concreto, a exposição a agentes químicos, umidade, temperatura e cargas estruturais. Sobre a descamação, é a forma de fragmentação causada pela perda de resistência devido a fissuras internas (mesonível) e deterioração química da pasta de cimento (micronível) Conforme Gobbi *et al.* (2023), estudos nesta área precisam ser desenvolvidos de modo a suportar melhores previsões de vida útil das ETEs.

Figura 4 - Velocidade de descamação do concreto



Fonte: Gobbi *et al.* (2023).

Sendo assim, podem ser feitas as seguintes considerações:

A velocidade de degradação do concreto em ETEs é um fator importante para a durabilidade das estruturas;

- A inspeção em ETEs pode fornecer informações sobre a degradação do concreto em estruturas de ETE existentes;

- Ensaios em corpos de prova podem simular as condições de ETE e ajudar a prever a vida útil do concreto;

- A escolha da velocidade de degradação a ser utilizada na previsão da vida útil das estruturas depende do tipo de estrutura e das condições de uso.

Os dados utilizados foram extraídos de NBR 6118:2023 com padrões considerados dentro das classes de agressividade ambiental previstas na normalização brasileira. A partir dos dados da NBR 6118 os quais foram comparados com os dados dos projetos fornecidos pela Corsan para as ETEs pré-cadastradas nesse estudo que possuem tais propriedades para verificação, conforme os referentes nos itens abaixo:

- com classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto tipo II - Moderada para zona urbana conforme a Tabela 7.1 – Classes de agressividade ambiental da NBR 6118:2023;
- fator de água/cimento < 0,5 e cobrimento de 4,00 cm conforme a ABNT 6118:2023.

Para a questão de ambientes agressivos pode-se destacar:

- a ação de degradação de ataques com o sulfato no concreto.

A ABNT em sua NBR 6118:2023 classifica o grau de agressividade à qual estará submetida a obra de acordo com o ambiente em que ela foi inserida. Por meio dessa classificação, é possível verificar qual deverá ser a relação água/cimento a ser adotada, como também qual a classe do concreto necessária para que o sistema se demonstre capaz de resistir às condições ambientais às quais estará exposto.

Ainda dentro desse assunto, conforme Bagattagin (2019 *apud* Pontes, 2019), conhecendo-se o grau de agressividade do ambiente em que a estrutura se encontra, existem algumas maneiras de prevenir possíveis manifestações patológicas, utilizando-se, por exemplo: o uso de concretos menos permeáveis, com baixa relação a/c, o uso de cimentos de alto-forno, pozolânicos ou resistentes aos

sulfatos, que apresentam um comportamento mais favorável com relação à durabilidade. A agressividade ambiental está relacionada também com líquidos como por exemplo a água servida e esgoto presentes no meio disposto para o concreto. Visto isso em Souza e Ripper (1998 *apud* Pontes, 2019) abordaram sobre a agressividade ambiental, ou seja, a capacidade de transporte de líquidos e gases presentes no meio ambiente para o interior do concreto. Os mesmos enfatizam que a combinação dos agentes ambientais como temperatura, umidade, salinidade, vento, chuva, agressividade química ou biológica, transportados para a massa de concreto, juntamente com resposta da massa de concreto com a tal ação, constituem dessa forma os principais elementos do processo de caracterização da durabilidade.

Nesse aspecto, com acesso aos dados pré-cadastrados das ETEs, será é possível constatar a agressividade com relação ao ambiente de exposição do concreto e também a relação a/c de projeto quando comparado à NBR 6118:2023 com relação à sua degradação ao tempo bem como ao ataque e que os índices de vazios facilitaram a penetração dos íons de sulfato na estrutura.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO QUÍMICO EM ETEs

A caracterização do meio químico em ETEs é um processo fundamental para garantir a qualidade do tratamento de esgoto e a proteção do meio ambiente. A análise dos parâmetros químicos permite o planejamento adequado dos processos de tratamento, o monitoramento da eficiência e o cumprimento da legislação ambiental, contribuindo para a preservação da saúde pública e do meio ambiente. Para estudar as possíveis formas de degradação do concreto, é importante caracterizar os processos químicos que podem agir diretamente de maneira deletéria no concreto. Dentro essa temática caracterização do meio químico em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) envolve a análise de diversos parâmetros que indicam a qualidade e a composição dos efluentes. Esses parâmetros incluem a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos, pH, temperatura, metais pesados, entre outros. As águas residuais ácidas por exemplo, são resíduos líquidos que resultam do uso humano e que alteram as características naturais da água e também são chamadas de águas servidas ou esgotos. O esgoto doméstico por exemplo, composto por elementos químicos tais como:

- As substâncias orgânicas estão presentes no esgoto que é composto por proteínas, carboidratos, gorduras e óleos, uréia, sulfatos que são um tipo de composto orgânico e os fenóis;
- O nitrogênio está presente no esgoto sendo o mesmo em diversas formas, incluindo proteínas, aminoácidos e uréia;
- O fósforo está presente no esgoto na forma orgânica e inorgânica;
- pH indica se o esgoto é ácido ou básico, sendo que esgoto sanitário bruto geralmente possui pH entre 6,7 à 8,0;
- A alcalinidade indica a capacidade do esgoto em neutralizar ácidos;
- Os cloretos estão presentes no esgoto e são provenientes da água de abastecimento e dos dejetos humanos;
- Os óleos e graxas estão presentes no esgoto e são uma fração da matéria orgânica solúvel.

Sobre a demanda química de oxigênio (DQO) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) são parâmetros utilizados para avaliar o grau de poluição do esgoto.

Um exemplo desses componentes está na Tabela 2 onde é possível verificar dados para DQO e sulfatos, que expõe a quantidade relativa a cada constituinte químico presente nos esgotos não tratados. Ainda sobre dados necessários para caracterização de um elemento contaminante, conforme Kim e Lee (2010 *apud* Dias, 2018) a concentração de sulfatos no esgoto de em uma ETE do Irã era de 186 mg/L e que em comparação com ao expresso na Tabela 2 é mais elevado. A Tabela 2 ilustra características químicas orgânicas do esgoto, nas quais não tem influência direta com a degradação do concreto, mas estão relacionadas com a atividade microbiana, que podem comprometer a durabilidade. A DBO, por exemplo é um dos parâmetros mais importantes para a operação de uma ETE, porém não apresenta ação direta com a degradação do concreto.

Tabela 2 - Concentração de constituintes químicos presentes no esgoto e não tratados

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*	2	25	45
Nitrito	0	0	0
Nitrato	0	0	0
Fósforo	4	7	12
Fósforo Orgânico	1	2	4
Inorgânicos	3	5	10
Cloretos	30	50	90
Sulfatos	20	30	50

Fonte: Dias (2019) adaptado de Metcalf e Eddy (2003).

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

De acordo com Mockaitis (2008 *apud* Pontes, 2019), o íon sulfato é a forma mais estável e difundida dos compostos de enxofre, podendo ser encontrado nos mais variados tipos de águas residuárias, desde o esgoto sanitário, com concentração de 20 a 50 mg/L até em descartes industriais, em concentrações que chegam a variar de 12000 a 35000 mg/L.

Também com relação aos valores referentes dos elementos que constitui os esgotos domésticos, da maneira que, para vazões de águas residuárias de 750 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 20 mg/L, enquanto para vazões de água residuárias de 460 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 30 mg/L e por último para vazões de águas residuárias de 240 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 50 mg/L, segundo Metcalf e Eddy (2003 *apud* Pontes, 2019).

Ainda há relação do ataque químico com o tipo de produto químico utilizado em cada ETE, como por exemplo o sulfato de alumínio utilizado nas ETEs padrão Corsan, que mantém as faixas de pH de 5 a 8. Em virtude disso, de acordo com Pinto e Takagi (2007 *apud* Pontes, 2019), cada ambiente das estações de tratamento de água e efluentes tem variações nos níveis de ataque ao concreto, sendo que o ataque pode ser proveniente dos próprios produtos químicos usados rotineiramente no tratamento. Os produtos químicos utilizados no tratamento da água e efluentes, como cloro, cal, soda, coagulantes e outros, podem causar reações químicas com o concreto, levando à sua degradação. Muitos dos produtos químicos usados no tratamento de água e efluentes são alcalinos ou ácidos, e podem reagir com os componentes do concreto, como o cimento. Essas reações podem levar à dissolução do cimento ou à formação de produtos de reação que diminuem a resistência do concreto. Como por exemplo, os coagulantes, como o sulfato de alumínio, podem reagir com o cimento, causando a formação de

compostos que podem diminuir a resistência do concreto. O sulfato de alumínio, ao entrar em contato com o cimento, especialmente com o cimento Portland, pode reagir com os compostos hidratados que formam a pasta de cimento. Sendo o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) um coagulante amplamente utilizado em estações de tratamento de água para remover partículas sólidas em suspensão. Ao entrar em contato com a pasta de cimento hidratada, os íons sulfato (SO_4^{2-}) podem reagir com os compostos hidratados do cimento, como o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$).

Também é possível verificar a análise de dados do pH e DQO na Tabela 3, referente as características do esgoto doméstico. O esgoto doméstico tem características químicas que incluem pH e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). O pH do esgoto doméstico geralmente varia entre 6,5 e 7,5, indicando uma leve acidez ou neutralidade. A DBO de 35 mg/L, é a medida da quantidade de oxigênio que os microrganismos consomem para estabilizar a matéria orgânica biodegradável presente no esgoto.

Tabela 3 - Características químicas de esgoto doméstico

Análise	Concentração	Análise	Concentração
Sólidos Totais	1100 mg/L	Fósforo	14 mgP/L
DBO	350 mg/L	PH	6,7 – 7,5
Óleos e Graxas	110 mg/L	Alcalinidade	140 mg/L
Nitrogênio Total	50 mgN/L	Cloretos	35 mg/L

Fonte: Collazi (2019), adaptado de Pinto e Tekagi (2007).

O esgoto doméstico possui características específicas, incluindo o pH, que geralmente varia entre 6,5 e 7,5, e a DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), que indica a quantidade de oxigênio necessária para a decomposição biológica da matéria orgânica. A DQO (Demanda Química de Oxigênio) mede a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação química da matéria orgânica, e sua relação com a DBO indica a biodegradabilidade do esgoto. No que diz respeito ao concreto, na presença de esgoto doméstico com alto teor de DBO e DQO pode afetar a durabilidade, especialmente se houver a presença de sulfetos que podem gerar corrosão.

Sobre a DBO e a DQO, ainda pode-se descrever que as mesmas não estão diretamente relacionadas à deterioração do concreto. Sobre os dados de, conforme Chernicharo (2007 *apud* Dias, 2018) a DQO, verificado na Tabela 4, como 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.

Tabela 4 - Curva padrão ou de referência para determinação colorimétrica da DQO, segundo o método oficial das APHA, AWWA, WPCF (Greenberg *et al.*, 1992): aquecimento a 140°C - 150°C em frascos fechados

DQO (mg L ⁻¹)	Absorbância* (A) (APHA, AWWA, WEF)
150	0,060 ± 0,013
300	0,096 ± 0,009
450	0,146 ± 0,005
600	0,186 ± 0,015
750	0,236 ± 0,009
900	0,288 ± 0,022

Fonte: Adaptado de Zuccari *et al.* (2005).

De acordo com Collazzi (2019), sobre os níveis de ataques em estações de tratamento de esgoto variam de acordo com o ambiente de tratamento. Também a digestão das bactérias *desulfovíbrio desulfuricans*, sobre compostos orgânicos ou inorgânicos de enxofre presentes nos esgotos, produzem o gás sulfídrico (H₂S), que são indesejáveis pelo fato de que oxidam e formam o ácido sulfúrico (H₂SO₄), que ataca a superfície do concreto e a armadura, ocasionando fragilização das barras de ferro, conforme Pinto e Takagi (2007 *apud* Collazi,2019). Ainda sobre a análise desses dados do esgoto doméstico, conforme Collazzi (2019), sobre o ataque ácido e a carbonatação, são motivadores iniciais da degradação do concreto por ácido sulfúrico biogênico, já que reduzem o pH da solução aquosa dos poros para que ocorra a colonização de bactérias oxidantes. Essa degradação é facilitada por fatores como ataque ácido e carbonatação, que reduzem o pH, permitindo a colonização de bactérias que oxidam o H₂S. A contínua dissolução de sulfeto de hidrogênio entre os poros do concreto, que se encontram acima no nível do efluente, em pH ≤ 3,0 - incita a formação de enxofre elementar, que como visto anteriormente,

é rapidamente oxidado à sulfato graças a atividade microbiana, também descreve Collazzi (2019). Com isso, se pode concluir, segundo Collazi (2019), sobre a degradação do concreto sob essa análise de dados, nas Figuras 6 e 7, a Concentração Análise Concentração Sólidos Totais 1100 mg/L Fósforo 14 mgP/L DBO 350 mg/L pH 6,7 - 7,5 Óleos e Graxas 110 mg/L Alcalinidade 140 mg/L Nitrogênio Total 50 mgN/L Cloretos 35 mg/L.

As características químicas de esgoto doméstico e do ácido sulfúrico biogênico (H_2SO_4), ao se dissociar na água presente nos poros do concreto, formam íons hidrogênio (H^+) e sulfato (SO_4^{-2}) que interagem com os íons cálcio (Ca^{+2}) e hidroxila (OH^-) formando a gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) - sulfato de cálcio dihidratado, conforme Assis e Real (2023). Ainda ocorre a presença da gipsita entre os poros do concreto que forma a etringita, que se caracteriza como sendo um produto expansivo que causa pressão interna nos poros do concreto e, conseqüentemente, a fissuração, acelerando o processo de degradação do concreto.

Ainda com relação a etringita, de acordo com Pontes, 2019 o sulfoaluminato de cálcio hidratado, é um composto químico formado com a base na presença de enxofre, alumínio, cálcio e água, normalmente em função do ataque de íons SO_4^{-2} . Este fenômeno ocorre no concreto nos primeiros instantes de hidratação, chamado de etringita primária. Também ocorre após o endurecimento do material, sendo então denominado como etringita secundária.

A etringita na forma tardia se descreve em uma manifestação patológica quando ocorre a expansão do concreto, promovendo a fissuração da pasta, o que pode levar à desagregação do material, com sintomas subseqüentes. A composição deste objeto químico é dada por $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, e seu processo de origem pode diferir em termos de formação primária ou secundária, conforme será visto posteriormente na análise dos resultados. Sobre o íon de sulfato foi possível verificar os seguintes parâmetros em esgotos domésticos em fontes pesquisadas:

A concentração de sulfato em esgotos domésticos, pode variar de 30 a 250 mg/L. A relação de formação de sulfeto de hidrogênio a partir de sulfato segue uma proporção estequiométrica de 1:3 em termos de massa, ou seja, um mol de sulfeto (S^{-2}) ou 32 gramas é produzido a partir de 1 mol de sulfato (SO_4^{-2}) ou 96 gramas. Para reatores anaeróbios, se considerando o aporte de sulfato como única fonte de enxofre oxidado, pode-se esperar a formação de 8 a 67 mg/L de sulfeto de

hidrogênio se 80% do sulfato fosse convertido a sulfeto de hidrogênio, de acordo com Wefm (1995 *apud* Glória, 2009).

Ainda sobre íon sulfato é a forma mais estável e difundida dos compostos de enxofre, podendo aquele ser encontrado nos mais variados tipos de águas residuárias, desde o esgoto sanitário, com concentração de 20 a 50 mg/L até em descartes industriais, em concentrações que chegam a variar de 12000 a 35000 mg/L. Se destacando as 76 emissões industriais das indústrias de papel, de processamento de alimentos, de explosivos e atividades que fazem combustão de combustíveis fósseis, de acordo com Mockaitis (2008 *apud* Pontes, 2019).

Também é possível a verificação de dados de projeto e dados coletados da amostra de esgoto doméstico. Segundo exposto por Metcalf e Eddy (2003) que os valores referentes dos elementos que constitui os esgotos domésticos, sobre a maneira que para vazões de águas residuárias de 750 litro/percapita.dia, e a concentração de sulfato está na faixa de 20 mg/L, também enquanto para vazões de água residuárias de 460 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 30 mg/L e por último para vazões de águas residuárias de 240 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 50 mg/L. Nesses valores estão incluídas fontes comerciais, industriais e institucionais, porém, os constituintes de fontes domésticas devem ser adicionados à estes valores, sendo este acréscimo de 15 a 30 mg/L de sulfato. Visto nas Tabelas 5 e 6 os dados de concentração de sulfato como referencial teórico para esgotos domésticos e que os dados coletados da ETE Alvorada estão dentro desta concentração.

Tabela 5 - Resumo da concentração de sulfato em esgotos domésticos

	Vazão 750 L/capita-dia	Vazão 460 L/capita-dia	Vazão 240 L/capita-dia
Concentração de Sulfato	20	30	50
Acréscimo típico – fontes domésticas (mg/L)	15-30	15-30	15-30

Fonte: Metcalf: Eddy (2003).

Tabela 6 - Faixas de variação das concentrações de sulfeto para efluentes e reatores UASB tratando esgotos domésticos

Sulfato (mg/L)		Sulfeto (mg/L)	
Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
20 – 60	1 - 9	0 - 2	8 - 14

50 - 100	4 - 10	-	20 - 30
----------	--------	---	---------

Fonte: Kulisch (2011).

Esses estudos ressaltam a importância de considerar as variações nos níveis de ataque ao concreto em diferentes ambientes das estações de tratamento, especialmente devido aos produtos químicos utilizados no processo. Esses estudos podem ser utilizados para orientar a escolha de materiais mais resistentes à corrosão e para o desenvolvimento de métodos de proteção do concreto em áreas mais suscetíveis a danos, conforme Pinto e Takagi (2007 *apud* Pontes, 2019)

2.3 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO EM ETES

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil devido à sua resistência e durabilidade. No entanto, existem diversos fatores que podem enfraquecer o concreto ao longo do tempo, comprometendo sua integridade estrutural. Um concreto com o traço mal dimensionado pode gerar problemas como na capacidade resistiva do concreto, um adensamento mal executado resulta em altos índices de vazios, uma cura insuficiente indica baixo grau de hidratação do cimento e um cobrimento inadequado proporciona uma menor proteção ao aço existente na peça entre outros problemas. É de conhecimento que quando esses quatro aspectos não tiverem conformidade, irão induzir à porosidade, permeabilidade e incapacidade protetora do material, proporcionando o surgimento de meios difusores para elementos naturais que o deteriorarão Mattos (2015 *apud* Pontes, 2018). A durabilidade de ETEs está diretamente relacionada às medidas preventivas adotadas em fase de projeto e aos cuidados tomados durante a execução das estruturas. Conforme Dias (2018), a normalização 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 várias normativas que classificam a agressividade do meio e determinam parâmetros de especificação de concretos tais como a ABNT NBR 6118: 2023, a norma americana ACI 318 (ACI, 2014), a norma europeia EN 206-1 (EN, 2013) e a norma britânica BS 8500-1:2006 (BSI, 2006), conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Requisitos de projeto e execução para estruturas sujeitas a ambientes quimicamente agressivos de acordo com normas brasileiras e internacionais

Origem	Norma	Classificação Ambiental	Agressividade Ambiental	Relação a/c	Resistência a Mínima do Concreto	Cobrimento (mm)	Consumo de Cimento (kg/m ³ de
--------	-------	-------------------------	-------------------------	-------------	----------------------------------	-----------------	--

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, acordo com os parâmetros de SO ₄ ²⁻ , PH, SO ₂ , NH ₄ ⁺ e Mg ²⁺	0,55	C30/37	50/75	300
XA 2		Ambiente com substância química moderadamente agressiva, acordo com os parâmetros de SO ₄ ²⁻ , PH, SO ₂ , NH ₄ ⁺ e Mg ²⁺	0,50	C30/37	BS EM 8500-1	320	
XA 3		Ambiente com substância química altamente agressiva, acordo com os parâmetros de SO ₄ ²⁻ , PH, SO 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		-
S1		As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Moderado	0,50	C28	50/65	-	
S2		As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Severo	0,45	C31		-	
EUA*		S3	As categorias são propostas de acordo com parâmetros de SO ₄ ²⁻ . Muito severo	0,45	C31	50/65	-
Brasil	ABNT 6118 ABNT 12655	IV	Classe de agressividade Muito Forte	0,45	C40	45 (lajes) 50 (vigas ou pilares)	360

Fonte: Dias (2018), adaptados de: EN (2013), ACI (2014), ABNT (2014) e ABNT (2015).

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

Com relação à durabilidade ainda pode-se dizer que:

- se faz necessária à 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.
- o ambiente das ETEs é agressivo, as falhas construtivas potencializam a ocorrência de manifestações patológicas.

Diante de todo o exposto, ficou explícito que o ataque de sulfato tem ação direta na degradação dos materiais bem como quanto da durabilidade do concreto quanto em contato com esgoto doméstico.

Conforme Helene (1983, *apud* Medeiros *et al.* 2011), há necessidade, por um lado, de conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente e, por outro, de conhecer o concreto e a geometria da estrutura, estabelecendo então a correspondência entre ambos, ou seja, entre a agressividade do meio versus a durabilidade da estrutura de concreto. Ainda sobre a ação de degradação conforme Medeiros *et al.* (2011), a resistência da estrutura de concreto à ação do meio ambiente e ao uso dependerá, no entanto, da resistência do concreto, da resistência da armadura, e da resistência da própria estrutura. Qualquer um que se deteriore, comprometerá a estrutura como um todo.

Concluindo, nas questões entre projeto e execução conforme NBR 6118:2023 para futuras execuções e contribuições desse estudo:

- a) Aprofundar estudos quanto a questão da permeabilidade da água no concreto;
- b) Promover tratamento e tecnologias para o concreto que não está estanque;
- c) Verificação do fator água cimento especificado em projeto, se é adequado para este tipo de execução de concreto em ETE;
- d) Constatação da falha da durabilidade do concreto e necessidade de melhorias;
- e) Há um nicho em expansão em procedimentos de recuperação em impermeabilização na área de terapias de concreto;
- f) Necessidade de implementação de interoperabilidade de processos, desde projeto até a execução.

Os dados coletados durante o processo descritivo e explicativo serão tratados, avaliados em algumas propriedades do concreto, e a partir desses estudos será possível verificar a durabilidade do concreto em ETE com ataque de sulfatos.

Para que a pesquisa seja desenvolvida foi necessário apresentar as características do ataque no concreto relacionado com a sua durabilidade conforme a especificação técnica da NBR 6118:2023, analisar esses dados, propor soluções ou uma forma de mitigar, bem como as características do concreto com relação à manifestação patológica, relacionando dados com as buscas em campo.

Para metodologia foram verificados dados de ETEs do Rio Grande do Sul - Brasil, ampliando, explorando a análise, bem como dados sobre a necessidade de estudo na área de infraestrutura, tratamento de água e esgoto.

Com relação aos dados técnicos sobre exemplos de metodologias de estudos foram verificados temas como:

Para cada estação foram levantados dados relativos à idade e aos tipos de tratamento de efluentes e, também, dados de projeto como fck, cobrimento nominal, relação água/ cimento e o consumo de cimento (Dias *et al.*, 2023).

Sobre a durabilidade ao longo do tempo, são necessárias diversas ações e procedimentos para que ocorra a garantia da estrutura e os materiais tenham o desempenho almejado.

Aspectos como a qualidade do concreto, efeito da agressividade do ambiente e a espessura de cobrimento devem ser detalhados no projeto de forma individualizada. A durabilidade e a resistência das estruturas podem ser alteradas pela exposição ao ambiente devido à degradação do concreto e armaduras (Assis; Real, 2023).

Dentre os fatos, ainda na fase antes da entrega, onde ocorre a necessidade de testagem, o concreto da ETE não estava estanque e esteve em contato com esgoto. O concreto da ETE iniciou um processo de degradação, com aparecimento da manifestação patológica onde ocorreu o ataque no concreto. Para recuperação do concreto foram tomadas diversas medidas e inclusive de referencial teórico para identificar e sanar o ataque ao concreto. Com relação à manifestação patológica em concreto de ETEs, é possível verificar através de bibliografia, que possui origem diversa, com diferentes sintomas e mecanismos de deterioração. Através da Figura 5, é possível verificar a ocorrência frequente da manifestação patológica em ETEs como por exemplo, o ataque ácido e ataque por sulfatos de origem biológica.

Em virtude desses fatores, ocorre a necessidade da aplicação de uma metodologia para o estudo e busca de dados reais em campo. Conforme a metodologia empregada por Dias *et al.* (2023), foram estudadas sete ETEs com diversificados tipos de tratamento. Sem caráter estatístico, os estudos de caso foram realizados com auxílio de procedimentos de levantamentos de campo. Foram realizados levantamentos de campo com base de análise visual da manifestação patológica com registro fotográfico e coleta de dados. Para cada ETE cadastrada foram levantados registros de dados de projeto, idade, patologia, fck do concreto utilizado, cobrimento nominal, relação água/cimento e consumo de cimento e posteriormente esses dados foram compilados em tabelas de gráficos.

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS EFLUENTES DE ETEs

A caracterização dos efluentes ou residuárias envolvidos compreendidas no estudo de ETEs, são águas de origem das atividades humanas e industriais. 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 Sistema de Esgoto Sanitário (SES) de acordo com Sperling (2014 *apud* Dias 2018). Os efluentes das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) são resíduos líquidos que passam por um processo de tratamento para serem lançados no meio ambiente de forma segura. As ETEs são estruturas que recebem água poluída, onde é tratada para ser reutilizada sem contaminação e necessitam de diversos elementos para que isso ocorra desde a fase de projeto até a entrega final após a execução. Ainda na fase de projeto, é necessária a verificação a durabilidade dos materiais, como o concreto, pois ficará exposto à ação de degradação aos constituintes do esgoto e para garantir a vida útil em estruturas de concreto de ETEs. Conforme Dias (2018 adaptado Sperling, 2014), os constituintes do esgoto, 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. Sobre a ação de degradação do concreto, os seus agentes agressivos que podem afetar as estruturas em concreto de estações de tratamento do esgoto doméstico são os sulfatos, o dióxido de carbono, cloretos e outros. Em virtude desses agentes agressivos, se faz necessária a verificação de parâmetros comuns em estações de tratamento de esgoto. Com isso, é possível verificar esses parâmetros através da norma europeia CEB-FIP Model Code 1990 (1993) que proporciona meios para avaliar o grau de agressividade química da classe de exposição, fornecendo valores limites para os teores de agentes agressivos e classificando o nível de agressividade química, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação da agressividade ambiental

Classificação da agressividade ambiental - CEB-FIP (1993)						
Classe de agressividade	pH	CO ₂ agressivo mg/l	Amônia NH ₄ ⁺ mg/l	Magnésio Mg ²⁺	Sulfato SO ₄ ²⁻ mg/l	Sólidos dissolvidos mg/l
I	>6	<20	<100	<150	<400	>150
II	5 - 5,9	20 - 30	100 - 150	150 - 200	400 - 700	150 - 50

III	4,5 - 5	30 - 100	150 - 200	250 - 500	700 - 1500	<50
IV	<4,5	>100	>250	>500	>1500	<50

Fonte: Tabela CEB-FIP (1993).

Também é possível verificar esses parâmetros através da ASTM 1012: 2004, concentrações de sulfato entre 3,2g a 6,0g SO₄/L ou 4,0g a 7,5g MgSO₄/L caracterizam-se pela formação de etringita e gesso e a deterioração e fissuração podem ser lentas e de difícil percepção. Existem também casos com dados, conforme Kim e Lee (2010 apud Dias, 2018) destacam que a concentração de sulfatos no esgoto de em uma ETE do Irã era de 186 mg/L.

Outra fonte de parâmetros é a *Water Environment Federation* - WEF (1995), que se trata de uma organização sem fins lucrativos, que fornece educação e recursos técnicos para o setor de água e este valor de concentração de sulfato em esgotos domésticos pode variar de 30 a 250 mg/L. Por fim, é possível também verificar elementos para a classificação do concreto e classe ambiental através do Quadro 2, da Companhia de Saneamento de Paraná (SANEPAR), no Termo de Referência para Elaboração e Apresentação de Projetos Estruturais, define as premissas básicas para a elaboração de projeto de estruturas em concreto armado ou protendido para obras de saneamento para Sistemas de Tratamento de Esgotos, elevado. Também é possível verificar a classificação da Companhia de Saneamento de Paraná (SANEPAR), que descreve a realidade das ETEs estudadas e destaca também sobre a necessidade de um fck = 40 MPa, valor superior ao projeto padrão Corsan um fck = 30 MPa.

Quadro 2 – Prescrições para elaboração e apresentação de estudos e projeto básico estrutural

						(continua)
ELEMEN TO CONSTR UTIVO	CLASSE AMBIEN TAL	CLASSE DE CONCR	FATOR a/c (máx)	COBRIM ENTO (cm)	DIMENS ÕES MÍNIMAS (cm)	ANEXO III – CLASSIFICA ÇÃO DOS ELEMENTO S ESTRUTURA IS PARA OBRAS DE SANEAMEN TO EM CONCRETO ARMADO DE ACORDO COM A NBR 6118 PARA O ESGOTO

MURO DE ARRIM O										
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fonte: Adaptado do Anexo 18 - SANEPAR PRESCRIÇÕES PARA ELABORAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS PROJETO BÁSICO ESTRUTURAL (2023).

2.5 CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO DE ETES

As ETES são grandes tanques de armazenamento de efluentes, em sua grande maioria confeccionado com concreto armado. Existem diversas tecnologias de tratamento de esgotos desenvolvidas para atender os objetivos de uma ETE. Cada tecnologia e processos possui características próprias e devem atender à uma projeção de vazão, diretamente relacionada à projeção populacional. Para este estudo e área de interesse nas ETES projetadas em concreto armado, que possui os módulos de tratamento, no caso os tanques, com estruturas em comum de maneira que a parede está dividida entre um e outro. Para fins de construção de uma ETE, conforme Luz *et al.* (2022), deve-se priorizar a qualidade dos materiais e o controle no processo de execução, permitindo o dimensionamento com peças cujas espessuras mostram-se adequadas à agressividade ambiente, com emprego de baixa relação água/cimento, alto consumo de cimento, compactação e cura apropriadas, fatores que tornem a permeabilidade do concreto o mais baixa possível. Dentro dessa temática, neste estudo que abordará os projetos estruturais para as obras da Corsan. As estações de tratamento da Corsan possuem um padrão construtivo conforme estas condições:

- Para concretos com resistência característica à compressão $f_{ck} \geq 30$ MPa (300 kgf/cm²), como é o caso de obras hidráulicas, foi utilizado cimentos Portland de resistência à compressão mais alta, como os tipos CP III ou CP IV, conforme projeto;
- Se trata de um sistema de esgotamento sanitário denominado ETES Compactas de padronização para vazões de 1 l/s, 2,5 l/s, 5 l/s e de 10 l/s;
- Os projetos padronizados das ETES Compactas com vazões fixadas em 1l/s, 2,5l/s, 5l/s e 10l/s, tem por objetivo a descrição detalhada dos projetos e a definição das especificações dos materiais e equipamentos à serem utilizados, com a consequente padronização da montagem dos itens especificados;

- As ETEs padrão Corsan são projetadas com reatores anaeróbios, que são sistemas de tratamento de águas residuais que utilizam microrganismos para decompor matéria orgânica na ausência de oxigênio. É um sistema utilizado para remover poluentes orgânicos;
- Concentração e carga de matéria orgânica de projeto: $DBO_5 = 300 \text{ mg/L}$
 $CODBOREATOR = 0,005 \text{ m}^3/\text{s} \times 86.400 \text{ s/d} \times 0,300 \text{ kg}DBO_5/\text{m}^3 = 129,6 \text{ kg}DBO_5/\text{d}$;
- No dimensionamento hidráulico/biológico do sistema de tratamento, foi fixada a DQO de 600 mg/L , aproximadamente $259 \text{ kg}DQO/\text{d}$, que corresponde a duas vezes a DBO_5 , proporção adotada correntemente quando o dimensionamento é realizado para unidades que tratam esgotos domésticos. Para esta concentração, a carga de DQO projetada:
 $CODQOREATOR = 0,005 \text{ m}^3/\text{s} \times 86.400 \text{ s/d} \times 0,600 \text{ kg}DQO/\text{m}^3 = 259,2 \text{ kg}DQO/\text{d}$
- Concentração de sólidos suspensos no efluente $38,00 \text{ mg/L}$;
- A abertura máxima das fissuras, para obras para fins hidráulicos será de $0,1 \text{ mm}$ (um décimo de milímetro). Tal valor poderá ser revisto para casos especiais, ficando sua adoção condicionada à aprovação por parte da CORSAN.
- Cobrimentos mínimos das armaduras:
 - superfícies externas das obras para fins hidráulicos, como superfícies em contato com a água, com o solo e face inferior da cobertura (plana ou em cúpula) dos reservatórios : 4 cm .
 - elementos de concreto em meio fortemente agressivo: $4,5 \text{ cm}$.
 - elementos de estruturas correntes ou mistas: obedecer rigorosamente a Tabela 7.2 da NBR 6118/2003;
- Na determinação das espessuras dos elementos da estrutura, haverá cuidado para que sejam tais que, observados os cobrimentos de armadura prescritos em "5", permitam uma concretagem adequada, dentro das possibilidades técnicas existentes.

Em função do que já foi dito neste item, é estabelecido pelo projeto padrão da Corsan, com as espessuras mínimas para as paredes de obras para fins hidráulicos as seguintes:

- para alturas $< 1,20 \text{ m}$ (calhas e canais) $\rightarrow e \geq 15 \text{ cm}$.

- para alturas maiores ou iguais a 1,20 m e menores do que 2,00 m → $e \geq 18$ cm.
- para alturas maiores que 2,00 m → $e \geq 20$ cm.

Além de atender ao exposto acima, as paredes com altura superior 2,00 m deverão ficar com um espaço livre entre as malhas internas da armadura de, no mínimo, 10 cm.

- Resistência característica do concreto à compressão, a ser considerada:

- $f_{ck} \geq 30$ MPa (300 kgf/cm²) – para obras para fins hidráulicos.
- $f_{ck} \geq 25$ MPa (250 kgf/cm²) – para obras para fins correntes.

- Armadura mínima (conforme itens 17.3.5 e 19.3.3.2):

Em todas estruturais de obras para fins hidráulicos foi utilizada uma armadura mínima (0,15 % b.h), para os aços CA-50 e CA-60 em ambas as direções mesmo em faces onde não ocorrem tensões de tração devido às solicitações correspondentes ao carregamento.

- Reforço de canto:

Todas as ligações parede / parede e parede / placa de fundo submetida à solicitações consideráveis serão dotadas de reforços. Nas ligações parede / parede os reforços serão em forma de chanfro a 45 com lados de, no mínimo, 20 cm. Nas ligações parede / laje de fundo, em decorrência de dificuldades construtivas, os reforços poderão ter seção retangular.

- Espaçamento das armaduras.

Os espaçamentos das armaduras em obras para fins hidráulicos devem ficar entre 8 (oito) e 15 (quinze) centímetros.

- Armadura das lajes de fundo.

A bitola mínima das armaduras da face superior das lajes será de 8 (oito) milímetros.

2.6 PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ETES

Sobre a questão das principais manifestações patológicas, Dias (2018), relata em estudo que o ataque complexo que acontece em uma ETE analisando três unidades específicas: o canal de entrada, o decantador primário e o tanque de aeração. Ainda relata sobre as relações de dados de estudo e dados de projeto para fins de determinação de parâmetros tais como os constituintes químicos (obtidos por difração de raios X). Conforme Sperling (2014 *apud* Dias, 2018), as manifestações

patológicas podem ter diversas origens ocasionando diferentes sintomas e mecanismos de deterioração. Conforme Hasparyk e Kuperman (2021), o conhecimento dos vários tipos de fenômenos deletérios que podem deteriorar o concreto se faz necessário para que medidas preventivas possam ser adotadas na fase de concepção do projeto. Ainda com relação aos efeitos deletérios, ou seja, essa degradação do concreto pode ser visualizada no Quadro 3, para estruturas em concreto com a ação ao local, no caso o esgoto, com sua relação através da agressividade. No Quadro 3 é possível verificar como fator determinante a ação química em diferentes ambientes como a ação da água no concreto.

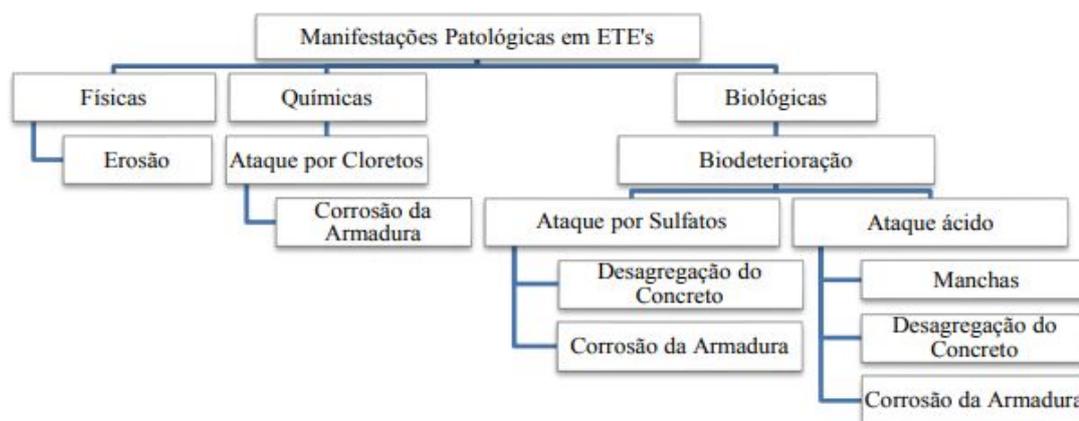
Quadro 3 - Fatores determinantes da corrosão em concretos

Fatores mecânicos	Fatores Físicos	Fatores biológicos	Fatores químicos
Entre os fatores mecânicos, as vibrações podem ocasionar fissuras no concreto, possibilitando o contato da armadura com o meio corrosivo. Líquidos em movimento, principalmente contendo partículas em suspensão, podem ocasionar erosão no concreto, com o seu consequente desgaste. A erosão é mais acentuada quando o fluído em movimento contém partículas em suspensão na forma de sólidos, que funcionam como abrasivos, ou mesmo na forma de vapor, como o caso da cavitação.	Os fatores físicos, como variações de temperatura, podem ocasionar choques térmicos com reflexos na integridade das estruturas. Variações de temperatura entre os diferentes componentes do concreto (pasta de cimento, agregados e armadura), com características térmicas diferentes, podem ocasionar microfissuras na massa do concreto que possibilitam a penetração de agentes agressivos.	Os fatores biológicos, como microorganismos, podem criar meios corrosivos para uma massa de concreto na armadura, como aqueles criados pelas bactérias oxidantes de enxofre ou sulfetos, que aceleram a oxidação dessas substâncias por ácido sulfúrico.	Os fatores químicos estão relacionados com a presença de substâncias químicas nos diferentes ambientes, normalmente água, solo e atmosfera. Entre as substâncias químicas mais agressivas devem ser citados os ácidos, como sulfúrico e o clorídrico. Os fatores químicos podem agir na pasta do cimento, no agregado e na armadura de aço-carbono.

Fonte: Filgueiras e Xavier (2023).

Para efeito de estudo é possível verificar os fatores de degradação no Quadro 3 e na Figura 5. Conforme Dias (2018), a distribuição proposta na Figura 5 deve ser considerada com certa precaução visto que as origens físicas, químicas e biológicas estão fortemente relacionadas, como, por exemplo, o ataque por sulfatos é uma degradação química de origem biológica.

Figura 5 - Manifestações patológicas típicas em ETEs



Fonte: Dias (2018).

Ainda conforme Dias (2018), existem trabalhos que realizaram inspeções com relação ao estado de conservação das estruturas de concreto de ETEs e tipos de manifestações patológicas detectadas ou revisões da literatura sobre as manifestações mais frequentes nessas obras de infraestrutura, tais como: fissuras, desagregação do concreto, corrosão do concreto, reação álcali – agregado (RRA), carbonatação, cobertura deficiente, contaminação por cloretos, eflorescências, falhas de concretagem, manchas, bolores, umidade, condições de gelo-degelo e erosão. O esgoto doméstico, especialmente em instalações como estações de tratamento de esgoto (ETEs), pode causar a degradação do concreto devido à sua alta agressividade. Sendo o esgoto agressivo ao concreto, especialmente em estações de tratamento de esgoto (ETEs) que utilizam tratamento anaeróbico. A presença de bactérias redutoras de sulfato (BRS) na lama de esgoto, em condições anaeróbicas, produz gás sulfídrico (H_2S) que, por sua vez, é transformado em ácido sulfúrico biogênico (H_2SO_4) por bactérias oxidantes de enxofre (BOE). O H_2SO_4 é um agente corrosivo que degrada o concreto, reduzindo sua durabilidade e que podem gerar custos para a manutenção. A agressividade do esgoto ao concreto, especialmente em sistemas anaeróbicos, é um problema significativo que também pode comprometer a vida útil das estruturas e gerar manutenção. Em virtude disso, a ação da degradação como por exemplo a corrosão por sulfatos exige a utilização de concretos com propriedades adequadas e a implementação de medidas de proteção, como a utilização de revestimentos impermeáveis e a manutenção regular das estruturas. Para isso, também é necessário a pesquisa de parâmetros sobre o

ambiente nas ETEs e a ação de degradação do concreto para viabilizar o estudo, conforme por exemplo a Tabela 9.

Tabela 9 - Agressividade do esgoto em relação ao concreto

Ambiente agressivo	Parâmetro de degradação	Referência normativa
pH	<5,5	NBR 12655:2022
Concentração de cloretos	>1000 ppm	BS EN 1008:2022
Concentração de sulfatos	>1500 ppm	NBR 12655:2022

Fonte: Dias et al. (2023) adaptado de Takagi et al. (2021).

Também é possível realizar outro tipo de análise através do parâmetro estabelecido em ETEs tais como analisando a influência de vários fatores na deterioração, como: idade da estrutura, características do concreto, unidade de tratamento e tipo de tratamento adotado na ETE.

Ainda sobre a Tabela 10 com relação ao pH, onde é possível verificar que a concentração de sulfatos é >1500 ppm com a referência normativa da NBR 12655: 2022. A Tabela 9 apresenta parâmetros de ambiente agressivo com a degradação do concreto, relacionados com o pH, cloretos e sulfatos, junto da respectiva referência normativa.

Em virtude disso, conforme Gobbi *et al.* (2023), na superfície inicialmente atacada há prosseguimento da degradação, com a descalcificação dos produtos resistentes, até o esgotamento de fonte de cálcio para a formação de gipsita. O pH reduz significativamente em valores menores que 1,0 pois há inibição da atividade microbiana. A superfície torna-se completamente friável. As bactérias proliferam-se em regiões mais internas do concreto onde o pH varia entre 1,0 e 9,0, dando sucessivo prosseguimento à degradação.

Os mecanismos principais de degradação em ETEs estão relacionados à exposição dos materiais que constituem o concreto em contato com o esgoto doméstico, tais como a corrosão nas armaduras e desagregação. A corrosão das armaduras é um processo no qual o metal é oxidado por ação do meio em que está e isso ocasiona a perda da resistência mecânica, a elasticidade e a ductibilidade. A corrosão das armaduras, um processo eletroquímico, envolve a oxidação do aço (metal) em presença de água e oxigênio, resultando na formação de

óxidos/hidróxidos de ferro (ferrugem). Essa oxidação leva à degradação das propriedades mecânicas do aço, como resistência, elasticidade e ductilidade, comprometendo a segurança e durabilidade da estrutura. Já a elevada alcalinidade do concreto, devido à presença de álcalis como Ca(OH)_2 , KOH e NaOH , protege as armaduras contra a corrosão. No entanto, em idades avançadas, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) pode se converter em carbonato de cálcio (CaCO_3) através do processo de carbonatação, reduzindo o pH do concreto. Essa redução no pH pode comprometer a camada de passivação que protege as armaduras, aumentando o risco de corrosão. Segundo Cascudo (1997 *apud* Dias, 2018) o concreto, devido a presença de álcalis (Ca(OH)_2 , KOH , NaOH), apresenta elevado pH. Em idades avançadas, o hidróxido de cálcio é convertido em carbonato de cálcio e o pH elevado do concreto passa a ser proveniente dos hidróxidos de potássio e sódio.

Com relação à desagregação, na superfície do concreto, devido aos ácidos produzidos e às reações que acontecem no biofilme nitrificante, o pH reduz e provoca um ataque ácido ao concreto. A desagregação da superfície do concreto pode ser causada pela produção de ácidos e reações em biofilmes, levando à redução do pH e a um ataque ácido ao concreto. A redução do pH cria condições favoráveis para a colonização de microrganismos, que formam um biofilme que, por sua vez, induz a deterioração química do concreto. Esse ácido dissolve compostos da pasta de cimento enfraquecendo-a e ocasionando desagregação (redução do cobrimento) (Dias, 2018). Por fim, sobre a ação de degradação do concreto, ainda é possível descrever que conforme Luz *et al.* (2022), o concreto atacado por sulfatos, tem a ação da deterioração onde começa nos cantos e arestas seguida de uma fissuração progressiva e lascamento que reduzem o concreto a um aspecto frágil e pouco rígido.

2.7 DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS EM CONCRETO DE ETES

A degradação do concreto, em obras de saneamento, pode ser causada por uma variedade de fatores, que podem ser divididos em:

- Exposição prolongada à água: a água pode penetrar no concreto, levando à corrosão das armaduras e à redução da resistência do concreto.

- Agentes químicos: a presença de sulfatos, ácidos e outros agentes químicos no meio ambiente pode atacar o concreto, causando sua degradação.
- Agentes biológicos: bactérias e algas podem colonizar o concreto, causando a sua degradação.
- Variações de temperatura e pressão: as variações de temperatura e pressão podem causar tensões no concreto, levando a fissuras e trincas.

A ação da degradação em estruturas em concreto, também conhecida como deterioração ou patologias, refere-se ao processo pelo qual o concreto, mesmo sendo um material robusto, sofre alterações que comprometem sua resistência, durabilidade e segurança ao longo do tempo. Essa degradação pode ser causada por diversos fatores, tanto naturais quanto por falhas humanas no projeto, execução e manutenção da estrutura. É importante ressaltar que a combinação desses fatores pode acelerar a degradação do concreto, comprometendo a durabilidade e a segurança das estruturas tais como:

- Corrosão das armaduras: é o processo de oxidação do aço, pode levar à dilatação do material, causando fissuras e trincas no concreto.
- Carbonatação: é um processo químico no qual o dióxido de carbono presente no ar reage com o concreto, alterando a sua composição e reduzindo a sua resistência.
- Desgastes mecânicos: o contato com objetos, veículos e outros elementos pode causar desgastes mecânicos no concreto, levando a fissuras e trincas.

Quanto à ação da degradação em estruturas em concreto Gobbi *et al.* (2023), destaca que alguns fatores podem influenciar direta ou indiretamente na taxa de degradação do concreto empregado em obras de saneamento. Os fatores que Gobbi *et al.* (2023), destaca para essa degradação são:

- A propriedade do concreto importante para a sua durabilidade é a permeabilidade;
- Com relação ao meio, a temperatura é um parâmetro de influência direta, isto porque ela impacta nas taxas de reações físico-químicas e biológicas;
- A umidade é outro fator de influência e níveis altos de umidade aumentam a atividade biológica, devido à maior disponibilidade de água;
- O pH do meio também exerce influência sobre a ação das bactérias.

- O processo de degradação é intensificado pelos ciclos de molhagem e secagem, devido à variação dos níveis de águas residuais, fricção de partículas e cavitação.

A ação da degradação do concreto pode ser causada por diversos fatores, como a reação química entre o cimento e os íons sulfato, a lixiviação e a expansão. Essa ação da degradação sobre o concreto por fim poderá causar uma patologia para a estrutura projetada.

Sobre a patologia em uma estrutura projetada é possível descrever que são defeitos que afetam a estrutura de uma obra, podendo surgir em qualquer momento da construção. As mesmas podem ser causadas por diversos fatores, como falta de planejamento, armazenamento inadequado de materiais e até o não cumprimento de normas técnicas. Dentro desse assunto temos a patologia em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) que são problemas tais como as corrosões de armadura, carbonatação e as fissuras que podem afetar as estruturas e o funcionamento do sistema. Conforme Hasparyk e Kuperman (2021), esse tipo de manifestação patológica pode ocasionar graves danos às variadas estruturas de concreto e aos elementos estruturais ao longo da vida útil.

Conforme a NBR 6118: 2023 a durabilidade é “a capacidade de a estrutura suportar as intempéries previstas e definidas em conjunto com o responsável pelo projeto estrutural e o contratante no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de acordo com as condições ambientais previstas na época do projeto. Quando utilizadas conforme recomendado em projeto. Conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.

Quando o assunto da durabilidade do concreto é relacionado para uma ETE, é necessário relatar que a mesma passou por teste de estanqueidade com esgoto antes de entrar em procedimentos para fazer rodar sua parte mecânica e operacional. A durabilidade do concreto em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) seja avaliada, o teste de estanqueidade com esgoto é uma etapa crucial para garantir sua resistência a longo prazo. A estanqueidade é um teste essencial para garantir a durabilidade do concreto em uma ETE. Ele contribui para a proteção da estrutura, evitando danos e prolongando a vida útil da ETE, reduzindo custos com manutenção e reparos. Este teste simula as condições de operação e ajuda a identificar possíveis falhas ou vazamentos que poderiam comprometer a integridade

estrutural da ETE. É nesse ponto em que, um concreto de $f_{ck} = 30$ MPa dimensionado para ETE, não for estanque, sofrerá ataque de sulfato de acordo com Gobbi *et al.* (2023). Conforme a NBR 12655:2022, o concreto, quando em contato com essas águas agressivas, deve apresentar determinadas propriedades, entre elas os decorrentes da relação água/cimento e da resistência à compressão (f_{ck}), em função da condição da agressividade do meio com vistas a aumentar a durabilidade e vida útil (ABNT NBR 12655:2022). A ABNT NBR 12655:2022, que trata do concreto de cimento Portland (preparo, controle, recebimento e aceitação), estabelece requisitos para o concreto em diferentes condições de exposição, incluindo aquelas em que o concreto está em contato com águas agressivas. Em ambientes agressivos, é importante salientar sobre a necessidade de redução da relação a/c para aumentar a resistência à infiltração de água e outros agentes agressivos. A relação água/cimento é um fator crucial para a resistência e a durabilidade do concreto assim como a resistência à compressão do concreto também deve ser adequada à agressividade do meio. Concretos com maior resistência são mais resistentes à ação de agentes agressivos, como sais e ácidos.

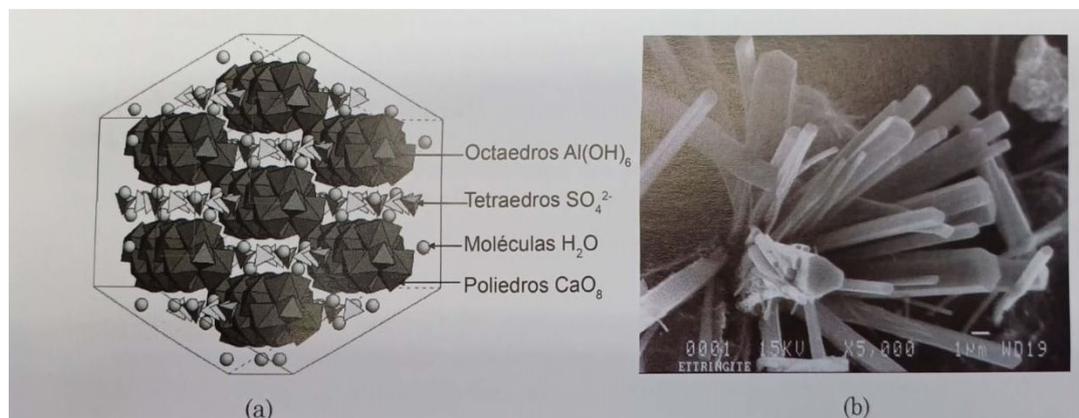
Garantir a vida útil de uma estrutura é compreender os mecanismos de degradação. No estudo de processos de degradação se pode estabelecer que a água é o principal agente de degradação das estruturas em concreto, pois é o veículo de transporte principal dos íons agressivos e sua movimentação é através da estrutura de concreto e pode ter efeitos deletérios. Pihlajavaara (1978) define durabilidade como a habilidade de resistir a mudanças de estado, que trata de suas propriedades. Metha e Monteiro (2014) já define que um concreto durável é aquele que mantém a sua forma, com qualidade e a capacidade de uso original quando exposto ao meio para qual foi projetado. No entanto, nenhum material é considerado eternamente durável; o concreto, mesmo possuindo características e propriedades que suportam situações adversas de uso e aplicações, muda ao longo do tempo suas propriedades internas pelas variações que ocorrem na sua microestrutura. Em virtude disso, é necessário expressar a composição dos materiais utilizados no cimento Portland CP IV utilizado nas ETEs - Corsan. O Cimento Portland Pozolânico, é de 15% a 50% de pozolana e também é composto por clínquer, gesso e outros. O CP - IV tem como característica a alta impermeabilidade e durabilidade, resistência a ambientes ácidos e contato com sulfatos, baixo calor de hidratação e

pouca porosidade. Com relação aos compostos do CP – IV temos o silicato de cálcio hidratado.

O cimento Portland tem como uma de suas principais fontes álcalis dentro do concreto. Uma vez no clínquer, os álcalis estão principalmente sob forma de sulfatos solúveis e outra constituição. Com relação aos sulfatos, sua ação sobre o concreto endurecido, quando em reação sulfática, no caso de origem interna, ocorre em consequência da elevação inicial da temperatura, provocando uma exotermia natural no material. De acordo com Hasparyk e Kuperman (2021), ataque por sulfatos (sais relativos ao ânion sulfato SO_4^{-2} .) se trata de uma ocorrência que traz fissuração e graves reflexos na integridade do concreto. Também informa que são várias fontes potenciais de sulfatos. Sendo as de ataque interno (ISA – *Internal Sulfate Attack*) e externas (ESA – *External Sulfate Attack*). As fontes externas são destinadas águas residuais industriais, águas do subsolo, esgoto, água do mar chuva e entre outros. Já as fontes internas são do cimento, adições, água de amassamento e agregados. Sobre a representação do cimento como principal fonte interna de sulfatos, uma das causas está relacionada a teores inadequados de sulfatagem (regulador de pega) no processo de produção. Se caso esse controle for apropriado, existem outras duas possibilidades que estão relacionadas à temperatura, ocasionando a formação de etringita tardia (*Delayed Ettringite Formation* - DEF). Sendo relacionadas com o elevado calor de hidratação e curas térmicas inadequadas. Essa ação sobre o concreto, é correspondida pela etringita de formação secundária, que é resultante da ação direta dos sulfatos externos que podem gerar tanto a expansão ou dissolução e recristalização da etringita primária.

A estrutura da etringita é constituída de colunas de cátions coordenados pelos oxigênios dos hidróxidos e das moléculas da água, conforme Figura 6. Conforme Nonat (2014) a formação de etringita tardia é causada além da elevação da temperatura, outros parâmetros do ciclo térmico, a composição do cimento, a dosagem do concreto e o ambiente. Com relação ao ambiente, quando saturado de umidade sobre a ação da elevação da temperatura, ocorre a etringita tardia. Exemplos de DEF e de formação de etringita podem ser verificados nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Formação de etringita: (a) Estrutura cristalizada da etringita e (b) imagem com microscópio de cristais de etringita



Fonte: Nonat (2014).

Figura 7 - Exemplo de fissuração por DEF



Fonte: Hasparyk e Kuperman (2021).

Ainda com relação aos concretos expostos a sulfatos a NBR 12655:2022 recomenda:

- preparos com cimento resistente a sulfatos de acordo com a ABNT NBR 5737;
- atender ao que estabelece a Tabela 1 que se refere à NBR 6118:2023 para classes de agressividade e estabelecer a relação água/cimento;
- atender a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}).

De acordo com Dyer (2015), em geral a resistência ao ataque de sulfato é melhorada pelo uso de concreto com um fator a/c inferior a 0,45.

Para justificar, ainda, de acordo Dyer (2015), a forma mais comum de ataque de sulfato ocorre em paralelo a formação de etringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (CaSO_4)_3 \cdot 32H_2O$) como produto da reação. Isso ocorre quando os cátions associados a íons de sulfato são o sódio, o potássio ou o cálcio. O ataque no concreto provoca reações expansivas podem ocasionar danos. Isso porque os compostos da reação

ocasionam forças de tensão nos elementos estruturais, podendo levar à sua fissuração, perda de desempenho mecânico e de durabilidade.

O ataque por sulfatos de origem interna se trata de um dos mecanismos de degradação mais agressivos ao concreto, uma vez que o sulfeto encontra - se presente disperso no interior da matéria.

Em geral o ataque por sulfatos incide sobre o aluminato tricálcico do cimento hidratado $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (designação simplificada C_3A).

As soluções de sulfatos podem reagir com o aluminato tricálcico do cimento hidratado ou com a alumina do agregado, causando expansões, fissuração, descamação do betão, amolecimento e desintegração.

Os cimentos mais vulneráveis são os cimentos tipo I – Portland. Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos, os cimentos pozolânicos (> 30%) e os cimentos com escórias (> 65%), são os que oferecem maior resistência, mas não tornam o betão imune ao ataque por sulfatos em todas as situações e para qualquer concentração das soluções. De fato aquelas adições contribuem para a durabilidade em condições de agressividade moderada, mas não evitam o ataque em betão de baixa qualidade.

Ainda sobre a questão da agressividade, conforme Filgueiras e Xavier (2023), a exposição do concreto à ação de esgoto sanitário em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) de digestão anaeróbica configura um ambiente de alta agressividade.

Com relação ao ataque por sulfatos de origem interna é um dos mecanismos de degradação mais agressivo ao concreto, uma vez que o sulfeto encontra - se presente disperso no interior do material, como por exemplo nos ninhos ou bicheiras.

Sobre os sulfatos de cálcio, magnésio, sódio e potássio existem em solos argilosos ou outros solos, frequentemente em quantidades consideráveis. A sua distribuição é muito heterogênea podendo-se verificar concentrações muito diferentes em zonas distanciadas de apenas alguns metros. Por exemplo, o gesso ocorre frequentemente em cristais discretos ou aglomerados de cristais ou locais mais concentrados.

Todos os sulfatos levam à deterioração do concreto de cimento Portland, mas o mecanismo e grau de ataque dependem do tipo de sulfato presente.

Por fim, sem tratamento, acabam com o material do concreto. Esse ataque acontece no momento em que o concreto está endurecido, essa formação de

etringita, de cor amarelada, resultante do sulfato que preenche as cavidades ao redor dos agregados, exercendo pressões de expansão no interior da peça de concreto. Isso pode causar à sua fissuração comprometendo o desempenho e durabilidade. De acordo Dyer (2015), para a formação de etringita por íons de sulfato infiltrados no concreto endurecido, o sulfato precisa entrar em contato com uma fonte de alumínio e cálcio. A formação da etringita tardia em estruturas manifesta-se por meio do desenvolvimento de uma rede fissuras multidirecionais. Conforme Carles-Gibergues e Hornain (2014) localização das fissuras multidirecionais, geralmente estão localizadas no interior das partes massivas de estruturas situadas em zonas de umidade elevada, como inicialmente na Figura 1, dentro do tanque e Figuras 8 e 9.

Figura 8 - Rede de fissuras de um pilar de ponte em contato com a água pela formação de etringita tardia



Fonte: Carles-Gibergues e Hornain (2014).

Quando se trata de degradação do concreto logo é associada a uma manifestação patológica, conforme a Figura 9 com exemplo em pilares e a Figura 10 e 11 em saneamento. A ação da degradação no concreto é um processo de deterioração que pode ser causado por diversos fatores, como ácidos, sulfatos, intempéries e uso inadequado. Os sulfatos estão presentes na água que contém resíduos industriais, nas águas subterrâneas em geral e na água do mar. Para o concreto, os sulfatos mais perigosos são amônia, $(\text{NH}_4) \text{SO}_2$, cálcio, CaSO_4 , magnésio, MgSO_4 e sódio, Na_2SO_4 de acordo com Souza e Ripper (1998 *apud* Sousa, 2021). Quando a ação de degradação das estruturas de concreto, com a

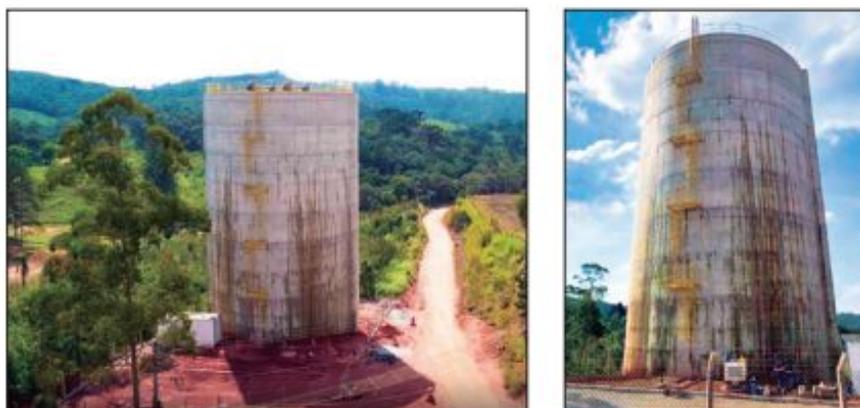
perda de aparência estética e a redução da resistência, pode levar a um colapso, além de alterar a estimativa de desempenho e durabilidade. Fatores como corrosão de armaduras, ataque de agentes agressivos, e defeitos na execução podem contribuir para essa degradação, comprometendo a segurança e a vida útil da estrutura, conforme pode ser visto nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 - Rede de fissuras no concreto da ETE Chico Mendes em contato com esgoto pela formação de etringita tardia



Fonte: acervo digital da autora.

Figura 10 - ETA de Taiapuêba, visão dos vazamentos ocorridos por fissuração



Fonte: Leifert (2023).

Figura 11 - Exemplos de estruturas de concreto



Fonte: Dias et al. (2023) adaptado de Recuperação de estruturas de concreto no Saneamento — CINPAR (2009).

A ação da degradação do concreto devido à reação química entre o cimento Portland hidratado e os íons sulfato pode ocorrer de duas maneiras: através da formação de sulfato de cálcio e através da formação de etringita. Visto na Tabela 10 que apresenta os principais mecanismos de degradação do concreto armado, os seus agentes, e os sintomas causados por tais mecanismos. Por exemplo a ação da degradação causada pela etringita ocorre na presença de três elementos: microfissuras, exposição à água ou ar saturado e liberação de sulfato tardio, de acordo com Souza e Ripper (1998 *apud* Sousa, 2021). Há também um dos problemas mais comuns com concreto são as fissuras. Ela pode apresentar na superfície várias fissuras interconectadas visto na Figura 10 e 11. E sobre as corrosões das armaduras podem determinar o fissuramento do concreto e até seu deslocamento fazendo com que sua armadura fique exposta ao ambiente.

Tabela 8 - Principais mecanismos de deterioração do concreto armado

(continua)

MECANISMO	AGENTES	AÇÃO	SINTOMATOLOGIA
1. Lixiviação	Águas puras, carbônicas agressivas e ácidas.	Carrear compostos hidratados da pasta de cimento	- Superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial; - Eflorescência de carbonato; - Elevada retenção de fuligem/fungos.
2. Expansão	Águas e solos contaminados por sulfatos	Reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado	- Superfície com fissuras aleatórias e esfoliação - Redução da dureza e do PH
3. Expansão	Agregados reativos	Reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos	- Expansão geral da massa do concreto - Fissuras superficiais e profundas.
4. Reações deletérias	Certos agregados	Transformações de produtos ferruginosos presentes nos agregados	- Manchas, cavidades e protuberância na superfície do concreto.
MECANISMO	AGENTES	AÇÃO	SINTOMATOLOGIA
5. Despassivação de	Gás carbônico de	Penetração por difusão e	- Requer ensaios

armadura	atmosfera	radiação com os hidróxidos alcalinos dos poros do concreto, reduzindo o PH dessa solução	específicos - Em casos mais acentuados, apresentam manchas, fissuras, destacamentos do concreto, perda seção resistente e da aderência.
6. Despassivação de armadura	Cloretos	Penetração por difusão, impregnação ou absorção capilar, despassivando a superfície do aço.	- Requer ensaios específicos - Ao atingir a armadura, apresenta os mesmos sinais do item 5.

Fonte: Sousa (2021) adaptado de Reis (2001).

Ainda sobre as reações químicas, podem ser resultantes de interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio ambiente externo e os constituintes da pasta de cimento como também os agregados. Também podem resultar de reações internas, tipo reação álcali-agregado, ou da reação da hidratação retardada CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento Portland, ou ainda, da corrosão eletroquímica da armadura do concreto ou até mesmo das reações com sulfatos, conforme Hasparyk e Kuperman.

Por fim, existe a possibilidade de ataques combinados, de acordo com Hasparyk e Kuperman (2021) é simplesmente uma associação de duas ou mais causas. Causas conjugadas podem ser atribuídas a uma interação entre RAA (reação álcali agregado) e o ISA, com cimento ou com o agregado ou ambos. Também podem ocorrer cm RAS (álcali –sílica) e a formação de etringita tardia DEF. O nível de deterioração por ataques conjugados pode ser tão severo e em curto prazo, cerca de um ano ou menos.

2.8 TRATAMENTO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ETEs

Com relação ao tratamento para uma estrutura de concreto com o tipo ação química, pode-se verificar a necessidade de recuperação e o tipo de terapia necessária para sanar o problema. Mediante isso é necessária a verificação à partir dos sintomas que se inicia todo o processo de averiguação das causas e origem do fenômeno patológico, fundamental para o correto diagnóstico. Através da observação de sintomas como fissuras, manchas, descamação ou corrosão das armaduras para uma demanda da necessidade de investigação. O tratamento de uma patologia em estruturas de concreto depende do tipo de problema e do seu

nível de degradação. Como a causa da degradação com ação química que pode ser por exemplo a carbonatação, no caso a reação do concreto com o CO₂ do ar, a agressão de substâncias químicas presentes no ambiente ou a corrosão por sulfatos.

Sobre a recuperação em estruturas de concreto armado, é um conjunto de métodos e técnicas que visam restaurar as propriedades mecânicas e funcionais das estruturas afetadas, prolongando sua vida útil e garantindo sua estabilidade. Os principais métodos incluem a reabilitação, que visa restaurar a funcionalidade original da estrutura; o reparo, focado na correção de danos específicos; e o reforço, que busca aumentar a capacidade estrutural conforme Almeida (2021 apud Silva et al., 2024). Sobre os possíveis tratamentos, podem envolver a aplicação de produtos químicos para inibir a carbonatação, a recuperação de áreas corroídas, a vedação de fissuras ou a remoção e substituição de elementos danificados, dependendo do tipo e do grau de degradação. As estruturas afetadas, necessitam a remoção e substituição do concreto danificado, ou o uso de materiais de reparo adequados, podem corrigir o problema. Referente ao ataque de sulfatos, a proteção ocorre mediante o revestimento do concreto com impermeabilizantes ou usar materiais mais resistentes. Em estruturas afetadas, a remoção e substituição do concreto danificado, ou o uso de materiais de reparo adequados, podem corrigir o problema. Para que essa correção ocorra, é possível destacar métodos tais como os seguintes processos abaixo:

- A limpeza da armadura de concreto é crucial para a recuperação e manutenção de estruturas, envolvendo a remoção de concreto deteriorado e da corrosão, que pode ser feita por meio de jateamento abrasivo, escovação ou com produtos específicos para corrosão. A primeira etapa consiste em remover o concreto deteriorado e solto, que pode ser feito com ferramentas manuais, como espátulas, ou mecânicas, como martelos pneumáticos. Após a remoção do concreto, a armadura deve ser limpa para remover a corrosão e a sujeira. Após a limpeza, a armadura e a superfície do concreto devem ser preparadas para receber o material de reparo. Com isso, pode envolver a aplicação de uma ponte de aderência, que é um material que garante a ligação entre o material de reparo e a estrutura.
- Uso de agregado mineral extrafino, como sistema autonivelante dentro dos tanques. Se trata de um tipo de primer incolor, que é utilizado como uma

barreira de vapor e antiumidade. Junto desse procedimento também se aplica como uma regularização a “*scratch coat*” (camada raspada), que é uma base rugosa para que o reboco ou revestimento se fixe bem, garantindo durabilidade e resistência, tornando o substrato livre de cavidades o estucando.

- Uso da tecnologia cristalina que aumenta a durabilidade, a resistência, o desempenho geral e a vida útil do concreto. São produtos de impermeabilização capilar cimentícia combinam cimentos de alta qualidade, quartzo, areia (de qualidade especial) e ingredientes ativos para fornecer um sistema mais eficaz para reduzir permanentemente a permeabilidade e impermeabilizar o concreto. A impermeabilização por cristalização é feita através da utilização de um aditivo ainda durante a preparação ou em forma de pintura com compostos químicos especiais. Nessa aplicação os compostos químicos da tinta penetram nos poros por osmose ou absorção e reagem com a pasta de cimento e água, formando os cristais em profundidade. Esse sistema é destinado para estruturas de concreto armado que ficam em contato com água, em locais com umidade extrema ou com molhagem e secagem constantes.
- Impermeabilizantes a base de PU vegetal que é uma resina de poliuretano vegetal de alto desempenho a base de mamona desenvolvido para a construção civil em obras de saneamento e obras sustentáveis. Esse tipo de resina forma uma membrana em PU que são materiais com alongamento mínimo de 50% e resistentes às intempéries que são produzidos a partir de uma matéria prima com alta performance.

Basicamente para execução da recuperação é necessário que:

- A superfície seja preparada onde há segregação do concreto, em locais com ninhos ou segregações e em juntas de concretagem, ao redor de insertos metálicos e no concreto;
- Em fissuras, em furos para armação de formas, também em armação exposta ou com baixo cobrimento de concreto sobre a armadura;

Em termos de recuperação, é possível realizar uma limpeza manual dos locais como juntas de dilatação, onde ocorrem formações de ninhos ou que tiveram penetração de água, que foram acometidos gravemente por sulfatos e outros. Esta limpeza pode ser verificada nas Figuras 12, 13 e 14 ainda com vazamentos nos tanques na ETE Chico Mendes.

Já para o processo de recuperação da estrutura na área externa das paredes dos tanques, é possível realizar a limpeza da estrutura e a abertura da junta de concretagem. O procedimento de recuperação em estruturas pode ser verificado conforme aplicado na ETE Chico Mendes, visualizado na Figura 12. Após o término dessa etapa é necessária a aplicação de uma pintura para garantir durabilidade e resistência contra intempéries e também protegendo.

Figura 12 - Tanque na ETE Chico Mendes, durante processo de recuperação da estrutura



Fonte: acervo digital da autora.

Por fim, há a necessidade de diminuir a entrada de fluídos no concreto e, que também está diretamente relacionada com a estrutura executada e com os poros e as fissuras existentes, foi necessário desenvolver terapias mencionadas nesse estudo para o concreto da ETE. Dentro do campo das terapias apresentadas para os locais acometidos gravemente por sulfatos, como nas juntas de dilatação bem como

algumas formações de ninhos ou até mesmo por penetração da água, foi necessária realização da limpeza, conforme a Figura 13 e 14.

Figura 13 - Marcação de pontos de vazamentos na ETE Chico Mendes, durante processo de recuperação da estrutura ainda com vazamentos



Fonte: acervo digital da autora.

Ainda no campo da terapia, sobre a necessidade de aplicação de uma camada de impermeabilizantes no concreto:

Os sistemas de impermeabilização, proteção e recuperação, têm-se desenvolvido com uma velocidade muito grande, em decorrência do empenho de fabricantes de materiais e pesquisas relacionadas a esse tema. (Filgueiras; Xavier, 2023).

Com relação à impermeabilização do concreto, esta costuma ser feita principalmente através do uso de seladores ou de películas protetoras, segundo Carter (1991) e Aldred (1988). Para a solução do problema, é necessário tratar o concreto, além da limpeza dos locais contaminados e acometidos gravemente por sulfatos, também é possível verificar uma variedade de produtos impermeabilizantes tais como primer, cristalizantes, selantes e membrana vegetal PU conforme a Figura 14.

Figura 14 - Fotografia fora do tanque na ETE Chico Mendes, durante processo de impermeabilização da última camada



Fonte: acervo digital da autora.

Reforçando que o objetivo do tratamento é impedir a penetração de água ou de líquidos de qualquer direção para proteger o concreto da deterioração. Após a impermeabilização, foi realizado o teste de estanqueidade nos três tanques e se constatou a estanqueidade da estrutura de concreto na ETE Chico Mendes.

Pode-se constatar que a através das leituras pesquisadas que o ataque por sulfato, ocorreu diante da relação água/cimento do projeto executivo, no processo executivo e também pela permeabilidade do concreto. Já com relação à durabilidade da estrutura de concreto da ETE Chico Mendes, a mesma falhou e apresentou problemas diversos ainda em carga, sendo que a estrutura em concreto atendeu o cumprimento ao ser projetada pela NBR 6118:2023 e construída sob as condições ambientais previstas na época do projeto e ocasionou a degradação do mesmo.

3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo do trabalho foram realizadas inspeções em dez ETEs localizadas em cidades do estado do Rio Grande do Sul, seguindo a metodologia apresentada por Dias (2023), visto anteriormente para o caso de sete ETEs. Após a inspeção realizada e as manifestações patológicas identificadas, foi determinado um tipo de ensaio e seguindo o diagnóstico da manifestação patológica para que posteriormente ser prescrito um diagnóstico dos problemas e assim garantir a vida útil da estrutura.

Conjuntamente com a inspeção “in loco”, foram determinadas as análises química do esgoto doméstico para a ETE Alvorada à fim de identificar o grau de agressividade que cada uma das ETEs em virtude de que a Corsan padroniza os projetos para execução Também foi possível determinar através das vistorias “in loco” o local da realização da retirada da amostra dentro de um tanque, que para este caso é a ETE Alvorada, devido à sua característica em possuir um poço seco⁰ onde é possível entrar no tanque. Tal poço seco refere-se a uma estação de tratamento de esgoto que utiliza um poço seco para o seu funcionamento. Nesse caso da ETE Alvorada, o poço fica acessível e seco sendo que somente enche quando há esgotamento máximo do esgoto doméstico, o extravasamento. As outras ETEs analisadas não tinham essa possibilidade de entrar dentro do tanque. Também foram coletados dados do próprio laboratório da estação, de equipamentos próprios e que são os registros da ETE Alvorada fornecidos pela Corsan, conforme a Tabela 18, que demonstra dados do pH e o DQO.

3.1 DESCRIÇÃO TÉCNICA DAS ETEs

Em relação a essa abordagem técnica, foi possível realizar um cadastro de dez da região metropolitana de Porto Alegre –RS para compilar dados para o estudo, conforme a lista que inclui uma síntese das ETEs, conforme a Tabela 11.

⁰ ETE em poço seco, conhecida como estação elevatória de efluentes, é uma estrutura que funciona como um poço, equipada com bombas, para elevar o esgoto do nível mais baixo para um ponto mais alto, geralmente para a ETE. Se trata da estrutura essencial em sistemas de coleta de esgoto que precisam transportar efluentes de áreas mais baixas para áreas mais altas.

Tabela 9 - Resumo de dados das ETEs pré- cadastradas

NOME DA ETE	LOCAL	IDADE (anos)	VAZÃO (l/s)	Resistência de projeto do CONCRETO (MPa)	Relação a/c	COBRIMENTO (cm)
Ponta da Figueira	Eldorado do Sul, 410 BR-116, Bairro Industrial	12,00	8,00	Não identificado	Não identificado	Não identificado
Ilhas Park	Estrada do Conde, 1100, Eldorado do Sul	10,00	1,90	30,00	< 0,5	4,00
Jardim dos Lagos	Rua Érico Veríssimo, Bairro Jardim dos Lagos, Guaíba	10,00	7,00	30,00	< 0,5	4,00
Guaíba	Estrada da Granja Santa Rita, Guaíba	10,00	60,00	Não identificado	Não identificado	Não identificado
Centro Novo	Rua Brasil, Eldorado do Sul	12,00	8,00	30,00	< 0,5	4,00
Chico Mendes	Rua Saracura, no Loteamento Chico Mendes, Cachoeirinha	10,00	5,00	30,00	< 0,5	4,00
Mato Grande	Av. Engenheiro Irineu Braga, Bairro Fátima – Canoas.	50,00	140,00	Não identificado	Não identificado	Não identificado
Esteio	Rua Carmem Miranda 510, Novo Esteio	30,00	60,00	Não identificado	Não identificado	Não identificado
Alvorada	Rua Estocolmo, Alvorada	10,00	6,00	30,00	< 0,5	4,00
Breno Garcia	Av. Breno Garcia, Bairro Imperial - Gravataí	10,00	4,00	30,00	< 0,5	4,00

Fonte: dados da autora.

As ETEs pré-cadastradas são da Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN é uma empresa criada em 1965 com o objetivo de prestar serviços de saneamento no estado do Rio Grande do Sul. Foi uma empresa estatal de economia mista do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, que atua em 317 municípios.

Desde 2023 a Corsan é administrada pelo grupo Aegea, por parte da privatização e a Ambiental Metrosul é a parceira da Corsan na transferência operacional do sistema e com a ajuda dessas parceiras será possível o acesso aos dados e a visitação “in loco” para o desenvolvimento dos dados para o estudo proposto. Também será possível compilar dados através desse estudo em campo e documental do acesso do acervo tais como idade das ETEs padrão, como por exemplo a ETE Chico Mendes e dados do fck, relação a/c, reparos realizados no concreto e posteriormente confrontar na conclusão os dados coletados para uma análise.

Foram coletadas imagens aéreas de dez ETEs bem como os dados técnicos para inclusão na metodologia e proposição de dados e viabilidade técnica deste estudo e analisá-las.

Com essas inspeções em campo é possível iniciar uma amostragem para o estudo e desenvolver dados técnicos para a pesquisa.

Também será possível compilar alguns dados iniciais que administrados após os primeiros problemas visíveis manifestados, na ETE Chico Mendes com o surgimento de infiltrações e manchas foram retirados testemunhos cilíndricos do concreto da ETE conforme segue:

Os projetos fornecidos e desenvolvidos pela Corsan são padronizados, com relação à vazão de $v=5$ l/s e também do concreto $fck=30$ MPa, com classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto tipo II - Moderada para zona urbana conforme a Tabela 6.1 – Classes de agressividade ambiental da NBR 6118:2023 e fator de água cimento $< 0,5$ e cobertura de 4 cm conforme o projeto padrão Corsan. A ETE Chico Mendes é um tipo de padrão Corsan, é uma estação elevatória com três tanques sendo um digestor anaeróbio, o intermediário FBAS, bem como por último o decantador e foi executada em Cachoeirinha – RS para um loteamento com finalidade do PAC – Programa de Aceleração do Crescimento. A Corsan trabalha basicamente com um padrão construtivo de ETEs com relação à sua vazão e para isso há um manual com os projetos e toda a documentação estabelecida para a execução, se trata de um escopo padrão.

Com isso os resultados obtidos nos ensaios realizados na ETE Chico Mendes durante a etapa de execução, conforme a Tabela 13, atendendo ao projeto, ratificando que resistência característica do concreto à compressão foi atendida.

Tabela 10 - Ensaio realizado durante a execução da ETE de controle de moldagem, cura e ruptura do concreto – corpos de prova

OBRA: SES-ETE ÁGUAS MORTAS								
MUNICÍPIO: CACHOEIRINHA				OPERADOR: EQUIPE				
PEÇA CONCRETADA: LAJE DE FUNDO								
VOLUME 7 m³								
Data de Moldagem	Número C. P.	Idade C. P. (dias)	Data da Ruptura	Carga Prensa (Kgf)	fck (MPa)	Abatim. (cm)	Nota Fiscal	fck Projeto
18/03/2016	25	7	25/03/2016	18250	22,78	10	048764	30 MPa
			6					
18/03/2016	26	7	25/03/2016	17800	22,22	10	048764	30 MPa
			6					
18/03/2016	27	28	15/04/2016	26100	32,58	10	048764	30 MPa
			6					
18/03/2016	28	28	15/04/2016	25900	32,33	10	048764	30 MPa
			6					
18/03/2016	29	63	20/05/2016	27900	34,83	10	048764	30 MPa
			6					
18/03/2016	30	63	20/05/2016	28900	36,08	10	048764	30 MPa
			6					

Fonte: acervo digital da obra.

Ainda com relação aos ensaios realizados, destaca-se o ensaio de Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto - NBR 5738, realizados durante a execução da ETE, conforme Figura 30 onde os resultados do fck =30 MPa, estabelecidos em projeto foram cumpridos, sendo que com esses dados é possível verificar que não ocorreu distorção com o concreto de fck = 30 MPa. Sendo que a resistência característica à compressão (fck) do concreto é uma propriedade fundamental para o dimensionamento e desempenho de estruturas em concreto armado. Indica a capacidade do concreto em suportar cargas de compressão antes de falhar, sendo um fator crucial para a segurança e durabilidade das edificações.

Também é importante salientar o uso do padrão estabelecido em projeto com relação ao cimento Portland na execução das ETEs padrão Corsan. Na construção de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), diversos tipos de cimento Portland podem ser utilizados, dependendo das necessidades específicas de cada projeto e das condições do ambiente. A determinação do tipo de cimento Portland também

influenciará com relação à durabilidade e a resistência à corrosão, essencial para estruturas que entram em contato com água e esgoto. A composição do cimento também influencia a durabilidade do concreto, especialmente em relação à resistência a agentes agressivos, como água e substâncias químicas. Bem como, quando combinada com adições minerais, pode aumentar a impermeabilidade do concreto, reduzindo a passagem de água e outros fluidos. Sobre o processo de fabricação do cimento Portland e sua composição, que influencia diretamente na durabilidade e é obtido através da calcinação, em altas temperaturas, chegando próximas aos 1500°C, por meio da moagem do clínquer (mistura de minerais) com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio (CaSO_4). Essa mistura é composta por calcário (carbonato de cálcio) e argilas (silicatos de alumínio e ferro), assim como de uma certa quantidade de gipsita [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] (gesso com grau de finura elevado), material controlador de pega (que atua como redutor da velocidade de hidratação) e eventualmente de substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro. Conforme Bauer (1994 *apud* Pontes, 2019), os componentes que fazem parte são a cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), constituindo de 95 a 96% do total de óxidos. Mas também existem outros componentes presentes, porém em quantidades menores, tais como, magnésia (MgO), anidro sulfúrico (SO_3), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), óxido de titânio (TiO_2), entre outros.

Foram realizados levantamentos de campo com base de análise visual da manifestação patológica com registro fotográfico e coleta de dados. Para cada ETE foram levantados registros de dados de projeto, idade, fck, cobrimento nominal, relação água/ cimento e consumo de cimento, conforme o exemplo da Tabela 13:

Tabela 11 - Dados operacionais de ETEs estudadas com informações técnicas

ETE	Ano de início de operação	Tipo de tratamento	Vazão do projeto (l/s)	Vazão tratada (l/s)
A	1988	Lagoas facultativas aeradas	30	37,81
B	2014	Reator UASB(UASB)+ Biofiltro(BF)+Decantador secundário(DS)	9	3,35
C	2008	UASB+BF+DS	4	1,02
H	2004	Tratamento primário quimicamente assistido	2290	1415
J	2012	UASB+BF+DS	40	5,9

P	1984	Lagoas anaeróbias+ Lagoa facultativa	90	110,29
S	2004	Lagoas facultativas + Lagoa de maturação	9	1,75

Fonte: Dias et al. (2023).

Porém, mesmo com o exemplo apresentado na Tabela 14 de Dias et al. (2023), ainda ocorreu a necessidade da aplicação de uma metodologia para o estudo, realização de ensaios para busca de dados reais e que foram coletados nas inspeções “in loco”. Tais ensaios são referentes à extração de amostra da parede dentro do tanque da ETE Alvorada e do esgoto. Esse é um método que possibilita a retirada de amostras do concreto para posterior análise em laboratório.

A coleta de amostras “in loco”, servirão para avaliar a qualidade e desempenho do material e outros dados tais como os defeitos em estruturas existentes. Também possibilitam identificar e corrigir problemas antes que causem falhas na estrutura e estimar a durabilidade da estrutura e planejar a manutenção. Esses ensaios podem ser destrutivos ou não destrutivos, e visam garantir a segurança e durabilidade das edificações. Para isso foi necessária a escolha de uma ETE entre as pré-cadastradas, viabilizando o estudo e do tipo de ensaio a ser aplicado no concreto.

Por fim, entre as dez ETEs inspecionadas, sete possibilitaram o cadastramento de dados técnicos para posterior continuidade da pesquisa, subsidiada por meio de experimentos verificados em outras pesquisas. A coleta e organização de dados servem de suporte para a aplicação de um método de pesquisa específico. Esse cadastramento com a coleta e organização de dados técnicos para a continuidade de uma pesquisa e aplicação de um método. Essa continuidade é apoiada por experimentos verificados em outras pesquisas. Trata-se de uma abordagem que usa dados e resultados de pesquisas anteriores como base para novas investigações e aplicações. Isso implica a identificação, coleta, organização e armazenamento de informações relevantes para a pesquisa em questão. Os dados coletados e organizados são utilizados para dar continuidade a uma pesquisa pré-existente, ou para lançar as bases de uma nova pesquisa.

Com relação às ETEs descartadas no estudo, os critérios adotados são referentes à falta de dados e também aos dados incorretos, irrelevantes, inconsistentes, duplicados ou com qualidade comprometida. Os dados que não se

encaixam no escopo da pesquisa ou não contribuem para a resposta das questões de pesquisa devem ser descartados por falta de dados técnicos, ETE que se encontra em processo de desativação e demais documentos de projeto são:

- ETE Esteio;
- ETE Guaíba;
- ETE Mato Grande – Canoas;
- ETE Ponta da Figueira.

As ETEs que permaneceram no estudo, onde foi possível a verificação de dados necessários para a continuidade da pesquisa são:

- ETE Ilhas Park;
- ETE Jardim dos Lagos;
- ETE Centro Novo;
- ETE Chico Mendes;
- ETE Alvorada;
- ETE Breno Garcia.

3.2 COLETA DE AMOSTRAS

Sobre a coleta de amostras de concreto, sendo extraídas na parede interna em um dos tanques da ETE Alvorada e a coleta de material líquido, no caso o esgoto na entrada da ETE para a realização de ensaios, tem por objetivo obter as informações sobre as características dos materiais e possíveis ações de degradação no concreto. Para isso foram realizadas três coletas de amostras na ETE Alvorada, sendo que duas coletas de esgoto e uma na parede interna do tanque, dentro do poço seco. A coleta de esgoto para ensaio envolve a captação de amostras de esgoto para análise em laboratório, visando avaliar a qualidade e composição do efluente. Esta análise é crucial para garantir a eficácia do tratamento de esgoto e o cumprimento das normas ambientais. O outro processo de coleta, a retirada de amostra da parede de concreto dentro do tanque da ETE Alvorada, o pó de concreto, refere-se a um material obtido por meio da extração com broca.

3.2.1 Coleta de amostra para o método NBR 16937-6 (ABNT, 2021)

A primeira coleta de amostra da ETE de Alvorada foi da água proveniente do esgoto doméstico logo na entrada da ETE e ocorreu diretamente no tanque, conforme a Figura 15, em junho de 2024, logo após o período das enchentes do RS. Posteriormente o líquido foi posto em uma garrafa pet com um litro e mantido refrigerado para não perder as suas características. O líquido foi levado para análise no laboratório de saneamento da Unisinos, visto na Figura 16. Salientando que a coleta de amostra de esgoto foi realizada em junho e posteriormente em setembro devido a possibilidade de alguma alteração nos resultados devido ao período de maio de 2024 com as enchentes no RS. Este ensaio estabelece um método para medir a quantidade de sulfato em água que entra em contato com o concreto no qual é estabelecido na NBR 16937-6. Esse ensaio ajuda a avaliar a capacidade do concreto de resistir à ação dos sulfatos presentes na água, que podem causar a deterioração do concreto. Essa norma é parte de uma série de normas que tratam da agressividade da água ao concreto, sendo a NBR 16937-6 específica para a determinação de sulfato.

Figura 15 - Coleta da amostra de esgoto doméstico na primeira semana de junho/2024



Fonte: acervo digital da autora.

Conforme utilizado por Ferreira (2022), para a realização desta pesquisa, adotou-se a metodologia NBR 16937-6: 2021 (ABNT, 2021b) para águas agressivas sobre concretos. Com isso adotou-se esse procedimento para a análise da amostra seguindo o procedimento da NBR 16937 – Águas agressivas – Durabilidade do Concreto Parte 6: Esta Norma estabelece o método de ensaio para determinação do teor de íons de sulfato na água em contato com elementos de concreto endurecido e a sua finalidade é avaliar o seu grau de agressividade pela formação de compostos expansivos causados pela ação dos íons sulfato. A norma aborda a durabilidade do concreto, especificamente a agressividade da água que pode afetar a resistência do concreto com o tempo.

Figura 16 - Fotografia da amostra sendo ensaiada no laboratório de saneamento



Fonte: acervo digital da autora.

3.2.2 Coleta de amostra do concreto

Para o prosseguimento nos estudos, foi determinado um segundo ensaio no local, dentro do tanque da ETE Alvorada para realização com a coleta de amostra, conforme Figura 17. A amostragem de concreto em pó, também conhecida como extração de amostras para ensaio, é um processo fundamental para garantir a qualidade e o desempenho do concreto em uma obra. A amostragem, especialmente quando feita corretamente, permite avaliar as propriedades do

material e identificar possíveis problemas antes que eles afetem a estrutura final. Com a verificação da qualidade dos agregados (areia e pedra) por exemplo, são componentes essenciais do concreto. A amostragem e análise dos agregados permitem identificar sua qualidade, tamanho e distribuição de grãos, que influenciam diretamente as propriedades do concreto. A amostra deve ser coletada em pontos representativos do concreto endurecido, de acordo com a norma aplicável e que foi coletada dentro do taque na parede onde há contato com o esgoto do lado de fora e com a passagem de tubulação. Foi necessário utilizar equipamentos adequados para a coleta e transporte da amostra, como, furadeira, broca, baldes, sacos, caixas e outros. A amostra deverá ser conservada em uma embalagem adequada para evitar a sua alteração ou contaminação. A amostra foi levada para o laboratório de materiais da Unisinos, para a determinação da composição química do concreto, como teor de cal, sílica, óxidos de ferro e outros.

Figura 17 - Fotografia dentro taque no local da coleta da amostra de concreto



Fonte: acervo digital da autora.

A amostra foi coletada dentro do poço seco da ETE de Alvorada, conforme a Figura 17 com a retirada de cinco amostras de concreto em pó da parede interna já acometida por patologia. Conforme Moraes (2012), a forma de extração de testemunhos é a coleta de pó de concreto. É um ensaio, de fácil execução, é mais favorável a estrutura. O ensaio destrutivo é realizado através de equipamento tipo

furadeira, onde o objetivo é a retirada de pó de concreto, resultado do uso da furadeira e não o furo em si. No momento da coleta do pó de concreto se deve utilizar uma furadeira elétrica, tubo de PVC para coleta do pó e também sacos plásticos para armazenamento do material.

Para garantir uma análise quantitativa mínima suficiente para a realização dos ensaios subsequentes, foi coletada em cinco gramas de pó de concreto, que pode variar de acordo com o ensaio a ser realizado.

Após a coleta do material, o saco plástico, é fechado, para evitar a contaminação do material, é necessário etiquetar as amostras com a identificação. Através da Figura 18 é possível verificar o momento em que foi medida e marcada a profundidade da extração da amostra dentro do tanque.

Figura 18- Fotografia durante a coleta de amostras de cimento dentro do poço da ETE Alvorada



Fonte: acervo digital da autora.

Foram coletadas cinco amostras da parede interna do poço seco, com broca 12 milímetros de vídea, coletada, até chegar à profundidade de cinco centímetros, conforme a Figura 18

As amostras foram embaladas e encaminhadas para o Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Unisinos para os ensaios em FRX. O Ensaio de Fluorescência de Raios-X é uma análise química semiquantitativa que fornece as porcentagens dos elementos presentes na estrutura do material.

A análise de FRX é um método de análise quantitativa da composição dos elementos da amostra, pela excitação de átomos e detecção de seus raios X característicos. É um ensaio baseado na energia da radiação de fluorescência emitida por um material após sua excitação com Raios-X, tornando possível identificar os elementos químicos presentes. A utilização da técnica de fluorescência de Raios-X - FRX permite uma rápida avaliação qualitativa dos constituintes da matriz.

3.3 VALORES PARA COMPARAÇÃO PESQUISADOS PARA AVALIAÇÃO DE DADOS COLETADOS

Conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022), os materiais constituintes do concreto não podem conter substâncias prejudiciais em quantidades que possam comprometer a durabilidade do concreto ou causar corrosão da armadura. A NBR 12655 é considerada a principal norma técnica sobre o concreto. Essa NBR especifica os requisitos para as propriedades do concreto fresco e endurecido e suas verificações, composição, preparo, controle e recebimento do material em obra.

No concreto com massa específica de 2300 kg/m^3 com 350 kg de cimento por metro cúbico, produzido com um cimento de 3% de gesso dará um teor máximo de sulfato de 0,46% por massa total do concreto. Sendo este, portanto, considerado como limite máximo para o teor de íons sulfatos encontrados no concreto, conforme Mazer et al. (2014 apud Araújo, 2016). Trata-se de um cimento Portland comum (CP I), pois cimentos com teor de gesso entre 3% e 6% são considerados cimentos Portland. A massa específica de 2300 kg/m^3 e o teor de sulfato (0,46%) são compatíveis com este tipo de cimento. O teor de sulfato no concreto é o resultado do teor de gesso no cimento, e deve ser controlado para garantir a durabilidade do concreto em ambientes com agentes agressivos. O cimento Portland comum (CP I) é o tipo mais básico e versátil, utilizado em diversas aplicações na construção civil, incluindo obras de saneamento. No entanto, para obras de saneamento que exigem

resistência a agentes químicos ou ambientes específicos, como esgoto e água do mar, podem ser preferíveis outros tipos de cimento com aditivos específicos, como o CP IV (cimento Portland pozolânico) ou o CP RS (cimento Portland resistente a sulfatos). O cimento Portland Pozolânico (CP IV) contém pozolanas naturais ou artificiais, conferindo maior resistência à ação de sulfatos e a ambientes com ataque ácido, como esgoto e água do mar. Já o cimento Portland Resistente a Sulfatos (CP RS) é especificamente projetado para resistir à ação dos sulfatos, comuns em esgotos, águas subterrâneas e ambientes industriais. A escolha do tipo de cimento depende das condições específicas do projeto e dos agentes químicos a que o concreto será exposto. Em obras que exigem resistência à ação de sulfatos, o CP IV ou o CP RS são os mais indicados.

Nesse sentido, conforme Araújo (2016) descreve que não existe uma norma que estipule a quantidade máxima de íons sulfatos aceitáveis para o concreto, mas existem íons sulfatos presente no cimento, por isso, toda amostra de concreto terá um valor mínimo deste composto.

Para caracterizar os valores coletados em amostras, o ensaio realizado por Araújo (2016), estabelece o valor máximo aceitável seria 0,46% de íons sulfatos presentes no concreto. O teor máximo de sulfato (0,46%) no concreto com 350 kg de cimento/m³ e 3% de gesso no cimento, quando comparado com a massa específica do cimento (2300 kg/m³), é característico do cimento Portland. Ainda é possível citar conforme Rheinheimer (2013 *apud* Araújo, 2016) que realizaram um ensaio de quantificação da concentração de sulfato na amostra de esgoto, cuja coleta foi realizada no mesmo local, e o resultado foi menor que 200 mg/l de SO₄⁻², com diluição ajustada. Também é possível verificar o laudo disposto na Figura 19 que identifica o valor de 200 mg/l de SO₄⁻².

Figura 19 - Quantificação da concentração de sulfatos em amostra de esgoto

RELATÓRIO DE ENSAIOS LABORATORIAIS						Nº.: 09763 / 13 - 00
CLIENTE						
Cliente: SARAH CHIMA KHOE						Proposta: 01413 / 13
Endereço: Rua Inocêncio Milani nº 502 - São Braz Curitiba - PR - C.E.P.: 82300-620						
DADOS DA AMOSTRA						
Data e Hora da Amostragem: 11/11/2013 14:00			Data e Hora do Recebimento: 11/11/2013 15:45			
Ponto de Amostragem: Entrada da Entrada do Tratamento			Tipo de Amostragem: Simples			
Responsável pela Amostragem: Cliente			Tipo de Amostra: Efluente Bruto			
Responsável pelo Transporte: Cliente			Procedimento de Amostragem: --			
Data de Fabricação: N.I.*			Validade: N.I.*			
Embalagem: frasco plástico			Lote: N.I.*			
DADOS DA(S) ANÁLISE(S)						
Data de Início: 18/11/2013			Data do Término: 18/11/2013			
Objetivo: Análises laboratoriais em amostra de Efluente - Sem comparativo com legislação vigente.						
RESULTADOS						
Análises Físico-Químicas						
Parâmetro	Método	LQ(*)	Resultado	VMP(?)	Expressão	
Sulfato	SM 4500-SO4-2 E	200,0	< 200,0	-	mg/L	
NOTAS						
(*)L.Q.: Limite de Quantificação do Método Analítico Utilizado / (?)VMP: Valor Máximo Permitido / N.I.: Dado(s) não informado(s) pelo Solicitante						
METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)						
APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22 ed. 2012.						

Fonte: Rheinheimer (2013 apud Araújo, 2016).

De acordo com Araújo (2016), a NBR 12655 (ABNT, 2022), a quantidade de sulfato presente na água é menor que 200 mg/L, o que indica uma condição de exposição moderada à fraca em função da agressividade. Para a Model Code - CEB-FIP (1993) esta quantidade de sulfato enquadra-se na classe I de agressividade ambiental. Nas duas normas, este valor confere que o risco de deterioração da estrutura é insignificante ou pequeno, conforme Araújo (2016). De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2022), uma concentração de sulfatos na água menor que 200 mg/L indica uma condição de exposição fraca a moderada à agressividade. Para a Model Code CEB-FIP (1993), esta quantidade de sulfato enquadra-se na classe I de agressividade ambiental. A NBR 12655 também especifica que, em casos de agressividade severa, é necessário utilizar cimento resistente a sulfatos e ajustar a relação água/cimento para garantir a durabilidade do concreto.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A apresentação e descrição com análise dos resultados serão dispostos na sequência, conforme foram descritos anteriormente na metodologia utilizada.

4.1 RESULTADOS

A apresentação mais relevante se deu através de dois ensaios na ETE Alvorada:

- Análise da amostra para o método NBR 16937-6 (ABNT, 2021b);
- Coleta de amostra para Raios-X (FRX)

4.1.1 Resultados através da amostra para o método NBR 16937-6 (ABNT, 2021)

Para a determinação de sulfato solúvel em água, a Norma foi repassada e conforme o item 8 foi dada abaixo:

Expressão dos resultados com cálculos para as coletas e a sequência desta etapa, onde o teor de sulfatos foi determinado através da equação abaixo:

$$1 SO_4^{-2} = \dots \quad (1)$$

Onde:

SO_4^{-2} = é a concentração de sulfatos calculada como o SO_4^{-2} e expressa em mg/l;

M 1 = é a tara do cadinho expressa em g;

M 2 = é a massa do resíduo mais o cadinho expressa em g;

0,4116 = fator de conversão de sulfato de barion de sulfato (SO_4^{-2}).

V1 = é o volume da amostra e expresso em ml

10^6 = é o fator de conversão de g/ ml para mg/l

Cálculo da primeira amostra em 17/06/2024:

$$m 1 1 = 43,0546$$

$$m 1 2 = 44,5723$$

$$1 SO_4^{-2} = \frac{((43,0634 - 43,0546) \times 0,4116 \times 10000000)}{200} \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

(2)

$$1 SO_4^{-2} = 181,10 \text{ mg/l}$$

$$m 2 1 = 43,0634$$

$$m 2 2 = 44,5811$$

$$2 SO_4^{-2} = \frac{((44,5811 - 44,5723) \times 0,4116 \times 10000000)}{200} \frac{\text{g}}{\text{l}}$$

(3)

$$2 SO_4^{-2} = 181,10 \text{ mg/l}$$

Coleta em 14/10/2024:

$$m 1 1 = 32,7942$$

$$m 1 2 = 34,5437$$

$$1 SO_4^{-2} = \frac{((32,7942 - 32,7846) \times (0,4116 \times 10000000))}{200}$$

(4)

$$1 SO_4^{-2} = 197,57 \text{ mg/l}$$

$$m 2 1 = 32,7846$$

$$m 2 2 = 34,5437$$

$$2 SO_4^{-2} = \frac{((34,5437 - 34,5437) \times (0,4116 \times 10000000))}{200}$$

(5)

$$2 SO_4^{-2} = 211,97 \text{ mg/l}$$

O motivo dessa coleta, da água de esgoto doméstico, é que em virtude do ciclo que varia desde o enxofre até o sulfato. O ciclo do enxofre é um processo natural que envolve a transformação do enxofre em diferentes formas, incluindo o sulfato. O esgoto doméstico contém substâncias que podem influenciar esse ciclo, e a coleta permite o tratamento e a remoção de compostos que podem poluir a água e o solo. Devido à morte dos vegetais e animais, essas proteínas e seus os compostos de enxofre, como o gás sulfídrico, formam os sulfatos. Baseado nisso, essa metodologia de determinação de sulfato solúvel em água expressa o resultado da coleta da amostra de 2 SO_4^{-2} é de 211,97 mg/l.

Para caracterização e parâmetros da amostra coletada na ETE de Alvorada foi necessário a busca de um agente agressor do concreto bem como a análise, verificação e constatação. Existe a possibilidade de ser dada de forma rigorosa a classificação da agressividade do meio ambiente, quando esta é baseada na concentração efetiva do agente agressor, e na forma indireta, quando se fundamenta somente nas condições de exposição ao qual o material está sujeito, de acordo com Helene (1988 *apud* Pontes, 2019).

Na sequência é possível verificar uma Tabela 14 que é o resumo com as classes de agressividade em função da quantidade de sulfatos definidas segundo algumas normas brasileiras e europeias.

Tabela 12 - Classificação da agressividade do meio ambiente em função da concentração de íon de sulfato presente no solo ou na água e algumas normas

NORMA	UNIDADE	NULA	FRACA	MÉDIA	FORTE	MUITO FORTE
Cembureau ² (1978)	mg/l	< 400	400-600	600-3000	3000-6000	> 6000
BRE Digest ² 250 (1986)	mg/l	< 360	360-1440	1440-3000	3000-6000	> 6000
IS:456 ³ (1978)	mg/kg	< 2400	2400-6000	6000-12000	12000-24000	
NEN 5996 ⁴	mg/l	< 200	200-500	500-1000	1000-2000	< 2000
CEB (1992)	mg/l	< 200	200-600	600-3000	3000-6000	> 6000
CETESB a		< 200	200-350	350-600	600-1200	> 1200
L1.007 b	mg/l	< 250	250-400	400-700	700-1500	> 1500
c		< 100	100-200	200-350	350-600	> 600

Fonte: Silva (1994 *apud* Pontes, 2019)

(a) - na presença de íons magnésio e amônia < 100 mg/l e íons cloreto < 1000 mg/l

(b) - na presença de íons magnésio e amônia < 100 mg/l e íons cloreto < 1000 mg/l

(c) - na presença de íons magnésio e amônia < 100 mg/l

Seguindo é possível verificar nas classificações adotadas pelas diversas normas, é possível concluir que as concentrações de íon sulfato relativamente nulas ou fracas como a 500 mg/litro já são consideradas agressivas. Para avaliar o teor de sulfato contaminante em uma estrutura, a norma ABNT NBR 16937-6 estabelece o método de ensaio para determinar a concentração de íons sulfato em água, enquanto a ABNT NBR 9917 define a determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis em agregados. A ASTM C 452:2019 - Standar Test Method for Potential-Cement Mortars Exposed to Sulfate especifica o método padrão para avaliar o potencial de reação de argamassas de cimento em ambiente com sulfatos. Sendo que:

- ABNT NBR 16937-6 é utilizada para avaliar a agressividade de águas em contato com estruturas de concreto, determinando a concentração de sulfato solúvel em água.

- A norma ABNT NBR 9917 determina a concentração de sais, cloretos e sulfatos solúveis em agregados utilizados na confecção do concreto.

- ASTM C 452:2019 estabelece um método padrão para avaliar a resistência de argamassas de cimento à ação de sulfatos.

Ao utilizar essas normas, é possível avaliar o teor de sulfato contaminante em uma estrutura, garantindo a durabilidade e a resistência do concreto em ambientes com presença de sulfatos.

Os resultados obtidos de acordo com a ABNT NBR 16937-6 Águas agressivas – Durabilidade do concreto Parte 6: Determinação de sulfato solúvel em água, foram:

Coleta em 14/10/2024

1 SO_4^{-2} = 197,57 mg/l

2 SO_4^{-2} = 211,97 mg/l

Coleta em 17/06/2024

1 SO_4^{-2} = 181,10 mg/l

2 SO_4^{-2} = 181,10 mg/l

Conforme verificado na bibliografia, os resultados obtidos no ensaio seriam relativamente nulas ou fracas, com valores de 500 mg/litro já são consideradas agressivas, porém quando comparado com a Tabela 6.1 da NBR: 61116:2023 a classificação seria moderada.

4.1.2 Análise de resultados na Coleta de amostra para Raios-X (FRX) amostras para Raios X (FRX)

Após a realização do ensaio no laboratório da Unisinos, uma vez com os resultados das análises do FRX conforme Tabela 16, se fez necessário separar os dados com os seus respectivos percentuais e lança-los em gráficos para verificação da presença dos elementos. O primeiro, o Gráfico 1 desenvolvido foi para elementos de amostragem no percentual entre zero até um por cento. E o segundo, o Gráfico 2 para elementos da amostragem entre um até doze por cento. Sobre a análise através do FRX, resulta que as cinco amostras são formadas basicamente por dois componentes o $\text{SiO}_2 = 41,517\%$ e o $\text{CaO} = 10,712\%$ no ponto P1 – 3,00cm (ponto com perfuração à 3,00 centímetros) e de metais alcalinos-terrosos 6,357% (MgO) durante a coleta das amostras. Apresentou também no ponto P1 – 3,00 cm ponto uma baixa concentração em óxidos de metais (Na_2O e K_2O) e alumínio (Al_2O_3). Os principais compostos analisados são o óxido de sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO), em proporções às da composição do Cimento Portland. Sobre a análise dos elementos presentes na coleta:

- Amostra de $\text{SiO}_2 = 41,517\%$ a ABNT NBR 13956-1 estabelece os requisitos de qualidade da sílica ativa utilizada em concreto, argamassa e pasta de cimento, garantindo que o material atenda a critérios de composição química, granulometria e outras propriedades físicas e químicas. Atender a esta norma é crucial para garantir o comportamento desejado do concreto em termos de resistência, durabilidade e outras características. A norma especifica requisitos como o teor de SiO_2 (dióxido de silício), que deve ser superior a 85% para utilização em pastas, argamassas e concretos;

- Amostra de $\text{CaO} = 10,712\%$, o óxido de cálcio (CaO) é um composto químico, também conhecido como cal virgem ou cal queimada, amplamente utilizado em diversas aplicações. É um sólido branco, alcalino e cristalino, obtido pela queima

completa do calcário. A cal virgem é conhecida por sua capacidade de reagir com a água, formando hidróxido de cálcio, e é utilizada em áreas como construção civil. As cinzas volantes com alto teor de cálcio ($\text{CaO} > 10\%$) são aquelas que possuem mais de 10% de óxido de cálcio em sua composição, geralmente classificadas como Classe C de acordo com a ASTM. Estas cinzas podem ter cor marrom clara ou escura e são frequentemente encontradas em cinzas de carvão mineral. As cinzas volantes, dependendo da sua composição química e do tipo de carvão utilizado, podem ter uma cor que varia entre marrom e cinza escuro. A cor é influenciada pelos constituintes químicos e minerais que as compõem. A Classe C, geralmente contém mais de 15% de CaO (óxido de cálcio) e a cor pode ser mais clara, com tons marrom ou amarelado, devido ao alto teor de cal. A Classe F, geralmente contém menos de 5% de CaO . A cor pode ser mais escura, com tons cinza ou marrom escuro, devido à menor presença de cal.

- Metais alcalinos-terrosos 6,357% indica a presença de um óxido de magnésio (MgO) numa concentração de 6,357% numa amostra ou composto. "Metais alcalino-terrosos" refere-se ao grupo de elementos químicos na tabela periódica que inclui berílio, magnésio, cálcio, estrôncio, bário e rádio. O magnésio (Mg) é um destes elementos e, como tal, quando se fala em "metais alcalino-terrosos 6,357% (MgO)", está-se a indicar a presença de uma certa quantidade de magnésio numa forma de óxido (MgO).

- A baixa concentração em óxidos de metais (Na_2O e K_2O) e alumínio (Al_2O_3) e essa baixa concentração de óxidos metálicos no concreto pode levar a problemas como corrosão da armadura de aço e desagregação do concreto. A carbonatação, que ocorre quando o CO_2 presente no ambiente reage com o concreto, é um processo agravado por baixas concentrações de óxidos metálicos, pois reduz a alcalinidade do concreto e destrói a camada protetora do aço, tornando-o vulnerável à corrosão.

- Amostra de $\text{SO}_3 = 0,473\%$ o trióxido de enxofre, um composto químico que, em condições normais, é um gás tóxico e corrosivo. É conhecido por reagir intensamente com a água, formando ácido sulfúrico. Quando reage com a água para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4). Já o ácido sulfúrico (H_2SO_4) é formado pela reação de trióxido de enxofre (SO_3) com água (H_2O). Essa reação é altamente exotérmica, liberando uma grande quantidade de calor. No concreto, o ácido sulfúrico pode estar

presente devido à reação de compostos de enxofre com a água, causando danos à estrutura ao longo do tempo, como a corrosão do aço.

- Amostra de óxido de alumínio o $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,612\%$ a alumina é um componente natural do cimento Portland e pode estar presente em diferentes quantidades dependendo do tipo e da qualidade do cimento utilizado pode ser utilizado no concreto como um material complementar para melhorar suas propriedades. Ele pode ser adicionado à mistura para aumentar a resistência mecânica, a resistência ao ataque químico e a resistência a altas e baixas temperaturas. Além disso, o Al_2O_3 pode ser utilizado em concretos refratários para melhorar sua resistência à oxidação. A composição química do cimento e, conseqüentemente, a quantidade de alumina, são fatores importantes para determinar a resistência e durabilidade do concreto. Os padrões de cimento (como NBR 12670 da ABNT) especificam as composições químicas permitidas para cada tipo de cimento, mas não especificam uma quantidade exata de alumina. A composição de cimento é determinada por outros fatores como o tipo de argila e cal utilizadas no processo de produção do cimento.

Tabela 13 - Elementos presentes na amostra no ensaio FRX

PONTOS (%) x ANÁLISES	P1 – 1,00 cm	P1 – 2,00 cm	P1 – 3,00 cm	P1 – 4,00 cm	P1 – 5,00 cm
Na ₂ O	0,021	0,685	0,161	0,021	0,021
MgO	4,545	4,435	6,357	4,425	4,022
Al ₂ O ₃	5,589	5,921	6,612	5,814	5,276
SiO ₂	27,336	27,811	41,517	27,656	27,635
P ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SO ₃	0,000	0,024	0,473	0,110	0,149
K ₂ O	0,884	0,789	0,468	0,373	0,459
CaO	9,769	9,240	10,712	9,529	10,472
TiO ₂	0,445	0,412	0,313	0,403	0,407
Cr ₂ O ₃	0,084	0,060	0,063	0,099	0,059
MnO	0,132	0,128	0,145	0,129	0,120
Fe ₂ O ₃	8,320	7,835	6,648	7,714	6,456
ZnO	0,027	0,017	0,008	0,017	0,010
SrO	0,029	0,029	0,026	0,026	0,029
L.O.I.	8,283	0,711	5,929	5,515	5,754

Fonte: acervo digital da autora.

Análise química qualitativa no ponto P1 – 3,00 cm:

- Elementos majoritários: SiO₂, CaO que correspondem à 41,517% e 10,712 %
- Elementos em pequeno percentual: SrO, ZnO, SO₃ que correspondem à 0,026%, 0,008%, e 0,473%
- Elementos intermediários: Fe₂O₃, Al₂O₃, MgO, que correspondem à 6,648%, 6,612%, e 6,357%
- Trióxido de enxofre (SO₃): 0,473% Óxido de magnésio (MgO): 6,357%
- Óxido de cálcio (CaO); 10,712 %
- Óxido de ferro III (Fe₂O₃); 6,648 %

Por fim, se faz necessário ressaltar que sobre a precisão na coleta de amostras podem ocorrer erros como contaminação da amostra, coleta inadequada ou armazenamento incorreto, podem levar a resultados imprecisos e comprometer a qualidade do diagnóstico. Para mitigar os erros e riscos, seria fundamental seguir procedimentos padronizados de coleta, armazenamento e transporte, utilizando equipamentos adequados, além de garantir a correta identificação e manuseio das amostras. Esse erro ocorre quando uma amostra coletada não representa de forma precisa a população ou o material a ser analisado, no caso a amostra coletada da parede do tanque interno da ETE Alvorada e podem levar a resultados imprecisos e comprometer a sua qualidade.

Porém os dados coletados nas amostras, podem ser observados componentes típicos de materiais cimentícios e de materiais originários dos resíduos da construção civil. Sabe-se que são utilizados no concreto, e por isso ocorre a presença majoritária dos óxidos de SiO₂ e CaO, em menor percentual SrO, ZnO, SO₃ (S enxofre) e além de outros elementos presentes na amostra.

Conforme Sousa *et al.* (2021), o FRX mostra na verificação predominância do mineral quartzo em sua análise sendo que o material se encontra, em grande parte em estado amorfo e que os mesmos se enquadram dentro da norma NBR 7211 como agregado miúdo. O quartzo é um mineral muito comum, composto principalmente por dióxido de silício (SiO₂), sendo que esse percentual foi de 41,517% contido na análise da amostra. A análise do material revela predominância do mineral quartzo, com grande parte em estado amorfo, e o material se enquadra como agregado miúdo de acordo com a norma NBR 7211: 2022.

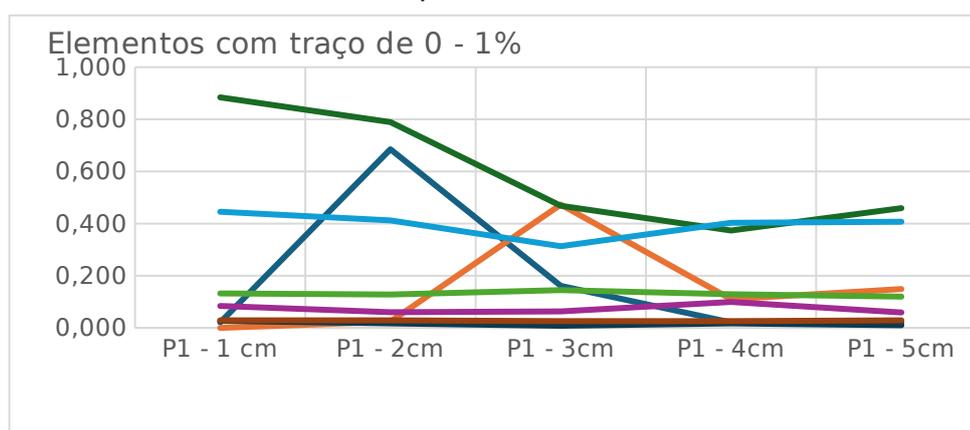
Conforme Barreto *et al.* (2024), sobre as análises químicas (FRX), pode-se concluir que o elemento mais predominante nas análises – sílica (Si) – é proveniente do agregado miúdo utilizado em grande quantidade no traço das argamassas. O segundo elemento mais abundante encontrado nas amostras analisadas é o cálcio (Ca); este elemento está presente na composição dos principais produtos de hidratação dos aglomerantes utilizados nas argamassas estudadas (etringita portlandita, CSH). Além disso, a presença dos elementos Ca, Al e S confirma a maior participação dos produtos de hidratação do cimento, principalmente a etringita

Conforme Assis e Real (2023), o desempenho dos materiais utilizados no concreto tem relação direta com:

Aspectos como a qualidade do concreto, efeito da agressividade do ambiente e a espessura de cobrimento devem ser detalhados no projeto de forma individualizada. A durabilidade e a resistência das estruturas podem ser alteradas pela exposição ao ambiente devido à degradação do concreto e armaduras. (Assis; Real, 2023)

É possível verificar a presença desses elementos relacionados com o propósito da pesquisa através dos Gráficos 1 e 2 dentro da verificação de cada percentual.

Gráfico 1 - Elementos presentes na amostra entre 0-1%



Fonte: acervo digital da autora.

Elementos presentes na amostra entre 0 e 1%:

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica utilizada para determinar a composição elementar de uma amostra, podendo ser usada para identificar elementos presentes em concentrações entre 0% e 1%.

É possível constatar nesse Gráfico 1 que em Na_2O , o óxido de sódio é um dos principais compostos alcalinos do cimento, juntamente com o óxido de potássio (K_2O).

Já a presença do SO_3 , o trióxido de enxofre é um agente sulfonante que adiciona grupos SO_3 a substratos, normalmente orgânicos, também é utilizado industrialmente para produzir ácido sulfúrico, outros químicos e explosivos. Ácido sulfúrico, também conhecido como vitríolo, é um ácido mineral composto pelos elementos enxofre, oxigênio e hidrogênio com a fórmula molecular H_2SO_4 . É um líquido viscoso, incolor, inodoro e solúvel em água, produzindo uma reação altamente exotérmica.

O K_2O , que é o óxido de potássio é um dos principais compostos alcalinos presentes no cimento juntamente do óxido de sódio. A presença de álcalis no cimento, como o K_2O e o Na_2O , pode causar reações com a sílica ou os carbonatos presentes nos agregados, gerando resíduos expansivos.

Sobre a presença do TiO_2 , o dióxido de titânio se trata de um agregador mineral que pode ser utilizado em cimento para proporcionar propriedades autolimpantes.

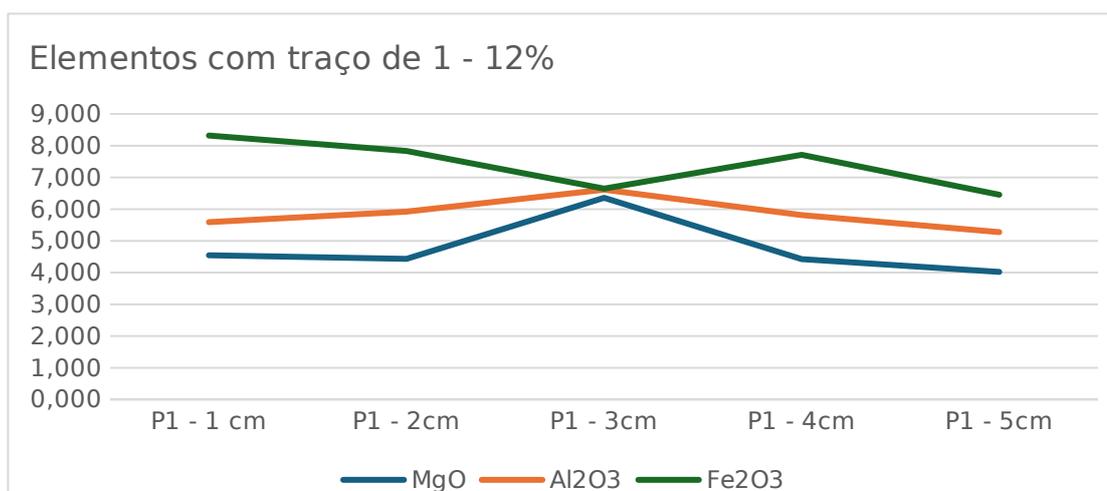
Com relação ao Cr_2O_3 , o óxido de cromo III, que tem a cor verde, é uma matéria-prima que pode ser utilizada na produção de cimento, mas o processo de fabricação do cimento pode oxidar o cromo e torná-lo mais tóxico.

O MnO , que se trata do óxido de manganês esse tem a aplicação como catalisador de reações químicas.

Sobre o ZnO , que é o óxido de zinco, esse afeta variavelmente o tempo de endurecimento dos cimentos, dependendo do método da sua preparação química e da sua fonte de obtenção.

Com relação ao SrO , o óxido de estrôncio, com coloração avermelhada, o material de partida para a produção de compostos de estrôncio é geralmente a celestina (sulfato de estrôncio).

Gráfico 2 - Elementos presentes na amostra entre 1-12%



Fonte: acervo digital da autora.

Sobre a análise dos elementos presentes na amostra entre 1 e 12%:

Através de um ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), foram identificados elementos químicos na amostra em concentrações entre 1% e 12%. O FRX é uma técnica que permite determinar a composição química de materiais.

Com relação ao MgO, o óxido de magnésio é o elemento que rapidamente reage com água quando exposto a umidade ou durante a mistura de concretos refratários, gerando uma camada de hidróxido de magnésio, Mg (OH)₂, na superfície das partículas.

Já o Al₂O₃, o óxido de alumínio, conhecido como alumina, está presente no cimento em virtude de que é um composto químico de alumínio e oxigênio e é o principal componente da bauxita, o principal minério de alumínio.

Sobre o Fe₂O₃, o óxido de ferro III, conhecido como hematita, ou ferrugem, é o elemento mais significativos em presença na amostra.

4.1.3 Inspeção visual

A análise visual por ser um método simples, foi realizada nas dez ETEs, com base na NBR 5462: 1994 que estabelece os conceitos e diretrizes para a gestão da confiabilidade e manutenção de equipamentos para classificação das estruturas de concreto e também uma das mais importantes, pois a identificação visual de manifestações auxilia na elaboração do diagnóstico. A norma auxilia na identificação e diferenciação dos tipos de manutenção (preventiva, corretiva,

preditiva), promovendo a adoção de estratégias mais eficazes, tais denominações abaixo:

- Manutenção Preventiva é realizada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios específicos para reduzir a probabilidade de falhas.
- Manutenção Corretiva é executada para reparar falhas e restabelecer a funcionalidade do equipamento.
- Manutenção Preditiva utiliza técnicas para monitorar o estado do equipamento e prever falhas futuras, permitindo ações preventivas.

Nessa análise teve como preferência os tanques com problemas e ação de degradação, acesso para retirada de amostras, a facilidade de acesso no ambiente interno e externo (dentro do tanque) e a possibilidade de realizar um acervo fotográfico de cada ETE inspecionada. Em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), o "interno" e "externo" dentro do tanque referem-se a diferentes partes do sistema de tratamento e às suas funções. O "interno" diz respeito aos processos que ocorrem dentro do próprio tanque, como a aeração, a decantação e a ação das bactérias. O "externo" refere-se a estruturas e equipamentos que auxiliam ou complementam o processo de tratamento, como bombas, sopradores e sistemas de controle. Dentro do tanque de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em carga, o que se encontra é o efluente (esgoto) em tratamento, passando por diversas etapas para remoção de poluentes. O tanque pode ser um tanque de aeração, onde a matéria orgânica é degradada por bactérias que necessitam de oxigênio, fornecido por sopradores. Além disso, podem estar presentes estruturas como grades para remoção de sólidos, caixas de areia para remoção de areia e outras partículas, e reatores biológicos para tratamento biológico do esgoto. Em virtude da carga foi necessária uma análise prévia para acessar as paredes internas das ETEs.

Sobre a análise do ambiente interno, ou seja, dentro do tanque, foi possível o acesso somente da ETE Alvorada por se tratar de um poço seco.

Sobre essa análise, Reygaerts (2003, apud Dias, 2018) 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. Sobre esse aspecto, foi possível caracterizar as seguintes ETEs:

ETEs caracterizadas para o estudo:

- ETE Ilhas Park;
- ETE Jardim dos Lagos;
- ETE Centro Novo;
- ETE Chico Mendes;
- ETE Alvorada;
- ETE Breno Garcia;

ETEs descartadas para o estudo:

- ETE Ponta da Figueira;
- ETE Esteio;
- ETE Guaíba;
- ETE Mato Grande – Canoas.

A caracterização ocorrerá dessas ETEs com similaridade em projeto e execução, idade, vazão, resistência à compressão de 30 MPa, cobrimento das armaduras, fator a/c e inclusive tanques de sulfatos que são utilizados no tratamento pela Corsan. Os tanques com sulfato são fundamentais para a remoção de impurezas e a obtenção de água potável. O sulfato de alumínio, por exemplo, é usado para a coagulação e floculação, processos que removem partículas em suspensão da água. Também foram analisadas as instalações com materiais pultrudados, que possuem vantagens frente à resistência e a corrosão, leveza, facilidade de instalação e menor necessidade de manutenção, tornando-os uma alternativa atraente para materiais tradicionais como aço e alumínio.

- 1) A ETE Ponta da Figueira, com idade de 12 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem e também sobre a ação de infiltrações, umidade e mofo conforme a Figura 20. Foi descartada por não possuir dados de projeto.

A manutenção realizada é emergencial de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto.

Ressaltando que a mancha em amarelo é de um acesso de tubulação com sulfato até a ETE e que o corrimão é pultrudado.⁰

⁰ Pultrusão é um processo de extrusão que une uma haste ou material plástico a uma estrutura específica.

Figura 20 - Parede da ETE Ponta da Figueira



Fonte: acervo digital da autora

- 2) ETE Ilhas Park com idade de 10 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem e também sobre a ação de infiltrações, umidade e mofo conforme a Figura 21 e a manutenção realizada é emergencial de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Ressaltando que a mancha em amarelo é de um acesso de tubulação com sulfato até a ETE e que o corrimão é pultrudado.

Figura 21 - Parede do tanque da ETE Ilhas Park



Fonte: acervo digital da autora.

- 3) A ETE Jardim dos Lagos com idade de 10 anos de construção apresenta presença da ação de degradação nas juntas de concretagem e também sobre

a ação de infiltrações, corrosão, umidade e mofo conforme a Figura 22 e a manutenção realizada é emergencial de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Ressaltando que ocorre a presença de infiltração junto da tubulação executada. Sobre a mancha em amarelo, a mesma está localizada nas placas da concretagem. Há a instalação de corrimão pultrudado e rede com presença de sulfato para o tratamento.

Figura 22 - Parede do tanque da ETE Jardim dos Lagos



Fonte: acervo da autora.

- 4) A ETE Guaíba com 10 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem e também sobre a ação de infiltrações, umidade e mofo conforme a Figura 23 e a manutenção realizada é rotineira de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Foi descartada por não possuir dados de projeto e operação divergente das demais ETEs, ou seja, pelo tipo de tratamento utilizado que é natural. Sua operação se dá pelo uso de plantas macrófitas para tratamento de água, embora tenha um componente natural e possa ser parte de um sistema mais amplo de tratamento, não é, por si só, um tratamento 100% natural. É uma alternativa que pode ser integrada a sistemas naturais, mas depende de processos biológicos e químicos que não são totalmente naturais. Ressaltando que a mancha em amarelo é de um acesso de tubulação com sulfato até a ETE e que o corrimão é pultrudado.

Figura 23 - Parede do tanque da ETE Guaíba



Fonte: acervo da autora.

- 5) ETE Centro Novo com idade de 12 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem, com presença de fluorescência, com exposição da armadura e também sobre a ação de infiltrações, umidade e mofo conforme a Figura 24 e a manutenção realizada é rotineira de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Ressaltando que o corrimão é pultrudado.

Figura 24 - Parede do tanque da ETE Centro Novo



Fonte: acervo digital da autora.

- 6) ETE Chico Mendes com idade de 10 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem e também sobre a ação de infiltrações inclusive na tubulação, presença de corrosão, erros de concretagem, umidade e mofo conforme a Figura 25 e a manutenção realizada é emergencial de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Ressaltando que o corrimão é pultrudado e não há rede de ligação com tratamento de sulfato.

Figura 25 - Parede do tanque da ETE Chico Mendes



Fonte: acervo digital da autora.

- 7) A ETE Mato Grande em Canoas de 50 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de dilatação entre estruturas conforme Figura 26. A manutenção realizada é rotineira de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Essa ETE foi descartada no estudo em questão por falta de dados de projeto e por estar em processo de desativação.

Figura 26 - Parede do tanque da ETE Mato Grande



Fonte: acervo digital da autora.

- 8) A ETE Esteio localizada em Canoas com divisa municipal de Esteio tem 30 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem, presença de fluorescência, presença de corrosão e presença de mofo e umidade conforme Figura 27. A manutenção realizada foi em processo emergencial de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto, porém se encontra em processo de desativação. Possui corrimão em pultrudado e com instalação de rede em sulfato, no caso desligadas. Essa ETE foi descartada no estudo em questão por falta de dados.

Figura 27 - Parede do tanque da ETE Esteio



Fonte: acervo digital da autora.

- 9) A ETE Alvorada tem 10 anos de construção está com presença da ação de degradação nas juntas de concretagem, presença de infiltrações e presença de mofo e umidade conforme Figura 28. A manutenção realizada é periódica de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Possui corrimão em pultrudado e também com instalação em ferro fundido e nesse caso o tanque tem acesso pois é uma ETE de poço seco. Possui também uma rede ligada em outros tanques com tratamento de sulfato.

Figura 28 - Parede do tanque da ETE Alvorada



Fonte: acervo digital da autora.

- 10) A ETE Breno Garcia tem 10 anos de construção está com presença da ação de degradação na junta de concretagem e presença de mofo e umidade conforme Figura 29. A manutenção realizada é periódica de acordo com a NBR 5462 que trata sobre esse aspecto. Possui o corrimão em pultrudado, e também uma rede ligada em outros tanques com tratamento de sulfato conforme Figura 30.

Figura 5 - Parede do tanque da ETE Breno Garcia



Fonte: acervo da autora.

4.1.4 Apresentação dos resultados

Além das amostras coletadas, onde foram realizados os ensaios do pó de concreto com o FRX e a coleta de esgoto através da NBR 16937-6:2021. E para determinar a análise de dados foi necessário realizar uma comparação com outros padrões com relação das características físico-químicas do esgoto da ETE de Alvorada. Para isso foram coletados dados do próprio laboratório da estação, de equipamentos próprios e que são os registros da ETE Alvorada fornecidos pela Corsan, conforme Tabela 16, que demonstra dados do pH e o DQO.

Tabela 14 - Características químicas esgoto doméstico da ETE Alvorada

Análise
pH: entre 6 e 9
Nitrogênio: no máximo 20 mg por litro de efluente
Dqo: máximo 150 mg por litro de efluente
Fósforo: máximo 1 mg por litro
Matéria flutuante: ausente
Gordura: ausente
Fonte: Corsan (2024).

4.1.5 Recomendações de terapias em tanques

Dentro do campo da terapia, os locais acometidos gravemente por sulfatos e outros, como nas juntas de dilatação, locais próximos das tubulações, algumas formações de ninhos de concretagem e até mesmo por penetração do esgoto foi necessário uma limpeza apurada inclusive em pontos de corrosão, conforme nas Figuras 31 e 32. A área afetada deve ser limpa para remover o concreto solto, os produtos de corrosão e os materiais contaminados. Sendo que no caso das armaduras expostas foram tratadas para remover a ferrugem e aplicar um produto anticorrosivo. A área foi reparada com uma argamassa especial para preencher os espaços vazios e restaurar a resistência da estrutura. Na Figura 30 é possível verificar a interação entre o antes e depois no local da ocorrência da degradação do concreto em pontos de infiltração da tubulação instalada.

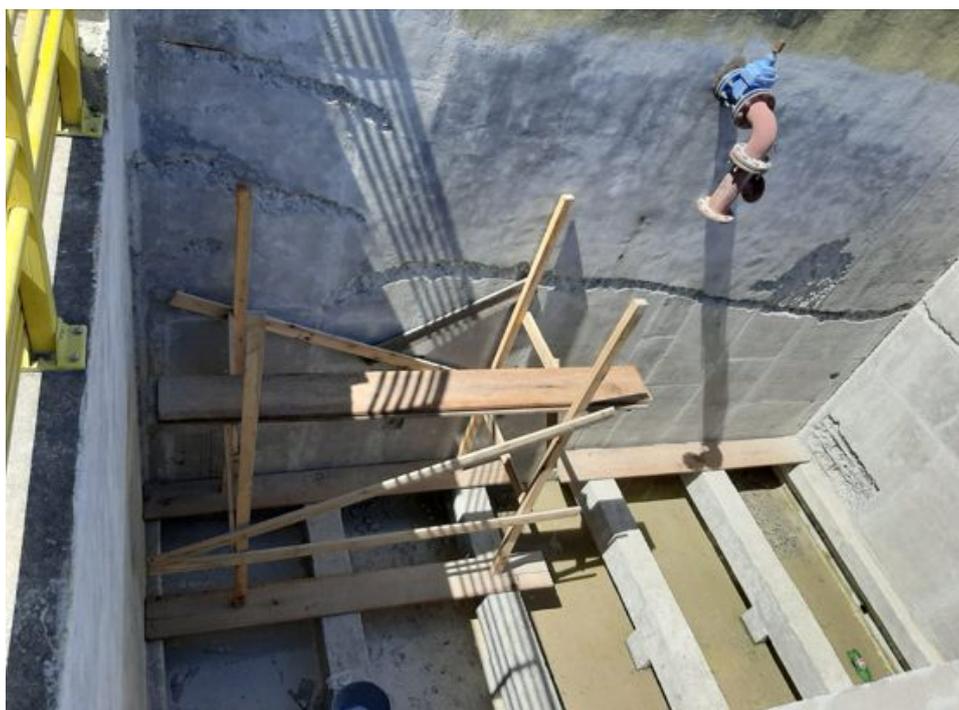
Figura 30 - Fotografia fora do tanque da ETE Chico Mendes antes e depois a da terapia



Fonte: acervo da obra da autora.

Também para a remoção manual com uso de ferramentas com o auxílio de talhadeira, ponteiro de metal (martetele), junto da demarcação do local previamente definida na estrutura degradada para posteriormente a realização de uma impermeabilização. Após o reparo, a estrutura deve ser protegida com uma camada impermeável para evitar a penetração de água e outros agentes agressivos.

Figura 6 - Fotografia dentro do tanque da ETE Chico Mendes durante a da terapia



Fonte: acervo da obra da autora.

Além da limpeza de áreas afetadas por sulfatos em concreto, a terapia para degradação também requer avaliar a causa da degradação, escolher um tratamento adequado (reparação ou reforço), aplicar a solução (como resina epóxi ou argamassa) e garantir a cura correta. É crucial também proteger as áreas reparadas com impermeabilizantes e evitar a exposição do concreto a fontes de sulfato no futuro. A degradação do concreto por sulfatos ocorre devido à reação entre os íons sulfato e os produtos hidratados do cimento, resultando em expansão e fissuração. Essa expansão pode levar à ruptura do material e à redução da durabilidade das estruturas. A expansão contínua causa fissuras e, em casos mais graves, a ruptura do material, comprometendo a resistência e a durabilidade da estrutura. Para terapia, na degradação do concreto, é essencial além da limpeza dos locais

contaminados e acometidos por ataque de sulfatos, produtos ofertados no mercado foram utilizados tais como:

- um primer a base de poliuretano vegetal. O primer é um material bicomponente, e, portanto, necessita da mistura entre resina e catalisador e é responsável por preparar o recebimento da membrana de PU;
- uma camada de cristalização composto por cimento Portland;
- outra selante para selar permanentemente microfissuras e poros e capilares contra a penetração de água ou líquidos de qualquer direção e protegendo o concreto da deterioração. O selante para concretos que sela microfissuras, poros e capilares, impedindo a penetração de água ou líquidos e protegendo o concreto da deterioração, pode ser um produto como a resina acrílica, que é frequentemente usada em ambientes com contato permanente com água, como reservatórios e hidrelétricas. Outros selantes, como os de poliuretano, também podem ser usados para selar juntas e fissuras, oferecendo proteção contra a umidade e a corrosão. O selante utilizado na ETE Chico Mendes foi de poliuréia que oferece alta resistência e flexibilidade, sendo ideal para juntas de dilatação e movimentação.
- uma última camada da membrana de poliuretano vegetal PU, vegetal, ou Poliuretano Vegetal, que é um impermeabilizante feito de óleo de mamona e que serve para a proteção em reservatórios contra infiltrações conforme Figura 32. O poliuretano é um polímero termorrígido, capaz de formar um material sólido, utilizado em diversos produtos que estão em nosso cotidiano. O poliuretano se encontra em versões vegetais e sintéticas e o que foi aplicado na ETE Chico Mendes foi o vegetal;
- Após a impermeabilização, se faz necessária a realização do teste de estanqueidade nos tanques para constatação da estanqueidade da estrutura de concreto. O teste de estanqueidade nos tanques é fundamental para confirmar a integridade da estrutura de concreto e garantir que não haja vazamentos e foi realizado na ETE Chico Mendes.

Figura 7 - Fotografia dentro do tanque da ETE Chico Mendes durante a impermeabilização



Fonte: acervo da obra da autora.

4.2 DISPOSIÇÕES FINAIS SOBRE À ANÁLISE DE DADOS

Com relação à apresentação dos dados e aplicação da metodologia, pode-se relacionar dados que tratam das manifestações patológicas típicas em ETEs também sobre o registro fotográfico realizado nas ETEs e por fim com os elementos presentes nas amostras, permite-se concluir que:

- ocorreu ataque por sulfatos onde há presença de desagregação do concreto e corrosão da armadura;
- ocorreu ataque químico onde há presença de manchas, desagregação do concreto e corrosão das armaduras.

Com relação à agressividade do ambiente, a NBR 6118:2023 que classifica os valores nas análises da ETE Alvorada verificadas como moderada. Porém esses valores quando comparados com os valores da pesquisa e pode-se verificar padrões agressivos em literaturas internacionais.

Sobre a relação a/c todas as ETES padrão Corsan mantinham o valor cimento < 0,5 e cobrimento de 4,00 para o concreto de 30 MPa atendendo o padrão da NBR 6118:2023 da Tabela 6.1 sobre os requisitos para o concreto exposto e sobre a correspondência entre classes de agressividade, porém quando verificado na literatura o recomendado seria inferior à < 0,45, conforme Dyer (2015). De acordo com Dyer (2015), em regra geral a resistência ao ataque de sulfato é melhorada pelo uso de concreto com a relação a/c inferior a 0,45. Conforme a Tabela 2 da NBR 6118:2023 a agressividade do meio ambiente está relacionada com às ações físicas e também químicas que atuam sobre as estruturas de concreto.

Com relação aos dados do pH coletados da ETE Alvorada conforme a Tabela 6 da NBR 6118: 2023 que descreve as características para o concreto exposto à soluções, é possível verificar o grau de severidade e para bibliografia pesquisada com relação ao pH entre 6 e 9 se trata de um padrão comum quando se trata de ETES.

Ao se tratar ainda sobre a durabilidade, todas as questões da necessidade de normalização quanto ao cobrimento, relação a/c e resistência do concreto relacionados à classe de agressividade a que o concreto estará submetido são bastante importantes, ainda é possível verificar a idade de funcionamento da ETES entre dez e doze anos já apresentando degradação no concreto. Essa degradação presente no concreto pode ter sido causada por diversos fatores, como: chuva, umidade, reação química entre o cimento Portland hidratado e os íons sulfato e outros.

Para garantir a durabilidade desse concreto, seria importante realizar inspeções periódicas e manutenções preventivas e corretivas. Quanto a periodicidade das inspeções, o tempo desempenha um papel fundamental na escolha do tipo de manutenção e na gestão de ativos. A manutenção preventiva busca minimizar interrupções e custos em longo prazo, enquanto a corretiva, embora necessária, pode gerar custos maiores e tempo de inatividade. A manutenção preditiva, por meio da análise de dados, permite antecipar falhas e otimizar a utilização dos recursos, reduzindo os riscos de falhas graves e

aumentando a eficiência da operação. A NBR 5462: 1994 não define um período específico para a manutenção. Mas a NBR 5462:1994 ela estabelece os princípios e definições para a gestão da manutenção, incluindo a manutenção preventiva, que é realizada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios específicos para reduzir a probabilidade de falhas. Por fim, boas práticas garantem a durabilidade, segurança e o bom funcionamento da estrutura ao longo do tempo, além de evitar custos elevados com reparos emergenciais. Sendo que frequência depende do tipo de estrutura, do ambiente e da legislação aplicável. De forma geral, recomenda-se realizar inspeções visuais e, se necessário, testes técnicos num intervalo de tempo pré-estabelecido tal qual na NBR 16747:2020, ou com maior frequência se a estrutura estiver em um ambiente agressivo.

5 CONCLUSÕES

São apresentadas as considerações finais do trabalho, respondendo aos objetivos propostos. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, que surgiram de observações na condução do trabalho.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ETE Alvorada padrão Corsan foi analisada como modelo entre dez ETES e submetida aos ensaios conforme padrões estabelecidos por normas técnicas brasileiras, com uma abordagem voltada para a durabilidade para sua construção em concreto.

Diante do exposto, ficou destacado que o ataque de sulfato tem ação direta à degradação dos materiais bem como quanto a durabilidade do concreto quanto em contato com esgoto. Conforme descrito anteriormente, sobre a concentração de íons sulfato ser compatível com os valores da literatura, é notório que as ETES são ambientes cuja agressividade é elevada conforme visto na classificação da Sanepar. Haja visto que o esgoto carrega os mais diversos materiais e podem reagir e levar a formação de compostos nocivos ao concreto armado. Sendo que vários compostos presentes no esgoto podem reagir com o concreto e causar danos. Estes compostos incluem sulfatos, ácidos orgânicos como o ácido acético e íons de cloretos. A reação com esses compostos pode levar à corrosão das armaduras de aço, à carbonatação do concreto e à redução da sua resistência e durabilidade. Porém conforme verificado na NBR 6118:2023 a classificação da agressividade é fraca ou moderada. Em virtude disso, referente a classe de agressividade ambiental da NBR 6118:2023, as ETES deveriam ser consideradas ambientes industriais quimicamente agressivos, cujo risco de deterioração da estrutura é elevado, ou seja, classe IV de agressividade ambiental, conforme visto na classificação da Companhia de Saneamento de Paraná (SANEPAR). Ainda nesse sentido é possível destacar a classificação dos elementos estruturais para obras da Sanepar, disposto anteriormente, na qual classifica os tanques como a classe ambiental IV, cuja agressividade é muito forte, e o risco de deterioração é possível verificar a classificação da Companhia de Saneamento de Paraná (SANEPAR), que descreve

a realidade das ETEs estudadas e destaca também sobre a necessidade de um $f_{ck} = 40$ MPa, valor superior ao projeto padrão Corsan um $f_{ck} = 30$ MPa.

Ainda adentrando nas questões de projeto, execução e concluindo conforme NBR 6118:2023 abordado:

a) Aprofundar estudos quanto à questão da permeabilidade da água de esgoto doméstico no concreto;

b) Promover tratamento e tecnologias para o concreto que não está estanque;

c) Verificação a relação água/cimento especificado em projeto, se é adequado para este tipo de execução de concreto em ETE;

d) Constatação da durabilidade do concreto através dos procedimentos de recuperação e impermeabilização;

e) Necessidade de implementação de interoperabilidade de processos, desde projeto até a execução.

f) Há necessidade conforme a Norma sobre a realização de inspeções periódicas nas ETEs, em virtude da conservação e durabilidade do concreto com recálculos da vida útil, para verificação das hipóteses iniciais adotadas nos projetos.

g) Há a necessidade de desenvolvimento de modelos de estudos aplicáveis na prática que representem com melhor precisão os fenômenos envolvidos e da modelagem dos mecanismos de degradação, principalmente da corrosão das armaduras, reação álcali-agregado e ataque por sulfatos.

Também como considerações para evitar a degradação do concreto e atender às exigências de durabilidade devem ser observados os seguintes critérios de projeto:

- Garantir um concreto de qualidade, principalmente em pontos frágeis e superficiais dos elementos estruturais. Quanto à qualidade do concreto em pontos frágeis e superficiais é especialmente importante, pois esses locais estão mais expostos aos agentes agressivos e podem ser pontos de início de defeitos;
- Garantia do cumprimento de cobrimentos de concreto apropriados para proteção às armaduras. Conforme estabelecido na NBR 6118:2023 que define as classes de agressividade ambiental e os valores mínimos de cobrimento para diferentes tipos de elementos estruturais;

- Detalhar adequadamente as armaduras (mais detalhes de projeto);
- Controle de fissuração;
- Prever espessuras de sacrifício ou de revestimentos protetores em regiões sob condições de exposição ambiental agressivas. Se trata de uma estratégia para prolongar a vida útil de estruturas, principalmente em ambientes corrosivos ou com alta humidade. Esta medida visa proteger a estrutura principal da corrosão ou desgaste, permitindo que a camada protetora (espessura de sacrifício ou revestimento) seja substituída antes que a estrutura principal seja afetada,
- Definição de plano de inspeção e manutenção preventiva para as estruturas. Este plano inclui inspeções periódicas, ações corretivas e preventivas, com o objetivo de identificar e corrigir problemas antes que se agravem e causem falhas inesperadas.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No decorrer da pesquisa perceberam-se que alguns aspectos podem ser avaliados para pesquisas posteriores, em virtude disso, sugerem-se alguns assuntos a serem estudados:

- Sobre a aplicação da metodologia utilizada para análise de ETEs para sua consolidação;
- Utilização da metodologia de recuperação de ETEs de mesmo porte e idade para replicar tal proposta;
- Avaliar a agressividade do ambiente como proposta para fins de melhoria de projeto e qualidade na execução do concreto;
- Há uma necessidade de manutenção no concreto e em virtude desse fato se faz necessário implementar uma metodologia para sua conservação em ETEs.

Para melhorar a resistência do concreto ao ataque de sulfatos, é essencial garantir que o concreto tenha uma baixa relação água / cimento, conforme visto neste estudo para que seja denso e tenha baixa permeabilidade.

Ainda dentro desta temática, fica para uma futura discussão a redução da agressividade do ambiente através da redução da quantidade de íons agressivos. Ou também da água que está disponível que possibilita essa agressão, mas é difícil de controlar essa prática devido ao meio que está inserido. Uma outra opção seria a modificação das características do concreto na etapa de projeto, tornando-o menos suscetível a degradação, porém, nesse caso seria necessária a utilização de um cimento com baixo teor de aluminato de tricálcico ou a incorporação de adições. Pode-se procurar retardar as condições de acesso do agente agressor ao concreto, buscando isolar o material do ambiente agressivo ou torná-lo impermeável, que nesse estudo ocorreu no tratamento das estruturas.

Também poderiam ser analisadas possibilidades quanto à utilização de uma impermeabilização no tanque de concreto, como foi utilizado na ETE Chico Mendes. E por fim, a realização de uma cura cuidadosa no intuito de reduzir a permeabilidade do concreto, ficam como sugestões e contribuições.

REFERÊNCIAS

- ALDRED, J. M. Chemical permeability studies on concrete using waterproofing admixtures. **HPI Concrete International**. Nov. 1988. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288205380_Chemical_permeability_studies_on_concrete_using_waterproofing_admixtures.
- ALVES, A. M. C. **Contribuição à análise da perspectiva de vida útil de estruturas em concreto face ao teor de cloreto registrado em Maceió-AL**. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/391>.
- ARAÚJO, J. M. de. **Avaliação dos efeitos deletérios de íons sulfato em estruturas de concreto armado de uma estação de tratamento de esgoto**. 2016. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- ASSIS, G. V. de; REAL, L. V. Ataque por ácido sulfúrico biogênico na ETE Parque Novo Mundo. **Concreto & Construção**, 110 ed. São Paulo: IBRACON, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações de segurança nas estruturas- Procedimento**. NBR 8681:2003. Rio de Janeiro, 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – NBR NM 7211. Especificação** Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Águas agressivas – Durabilidade do Concreto Parte 6: Determinação de Sulfato solúvel em água**. NBR 16937-6:2021. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland — Requisitos**. NBR 16697:2018. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimentos Portland Resistentes a Sulfatos**. NBR 5737. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto de Cimento Portland, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. NBR 12655. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio, preparo, ensaio de corpos cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto Extração, preparo, ensaio de análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 1: Resistência à compressão axial**. NBR 7680-1. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. NBR 6118:2023. Rio de Janeiro, 2023.

ASTM C 1012-04. **Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution**. 2004. 6p.

BARRETO, M. de F. e O. *et al.* Caracterização de argamassas de cimento Portland utilizando difração de raios-x (DRX) e fluorescência de raios-x (FRX): etringita, portlandita e silicato de cálcio hidratado (CSH). São José dos Pinhais, Paraná, Brasil. **Revista de Gestão de Secretariado – GeSec**, v. 15, n. 7, p. 1-17, 2024.

BONADEU, J. R. **Análise da penetração de cloretos no concreto armado expostos em ambiente natural e simulado**. 2016. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8060/2/CT_COECI_2016_2_14.pdf.

BRELKAILO, F.; PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. Visão sistêmica sobre publicações relacionadas aos modelos de previsão do ataque por sulfatos em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, jul.-set. 2023.

CAMACHO, G. N. S. **A ação combinada da carbonatação e dos cloretos: avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em betões carbonatados**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado Internacional em Sustentabilidade do Ambiente Construído) - Universidade do Minho (Portugal), 2015. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/965018ddbae14efb2d5b16a1034c5402/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em:

CARLES-GIBERGUES, A.; HORNAIN, H. Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. *In*: . CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Eds.). **Durabilidade do concreto**. São Paulo: IBRACON 2014, cap. 10.

CARTER, P. Sealing to Improve Durability of Bridge Infrastructure. **Concrete International**. American Concrete Institute, p.33-36, jul. 1991.

COLLAZZI, R. C. **Patologias Construtivas em uma Estação de Tratamento de Esgoto**. 2019. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. **CEB Bulletins d'Information**, n. 213-214, 1993.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE PARANÁ (SANEPAR). **Manual de Projetos de Saneamento - Módulo 7**. Prescrições para Elaboração e apresentação de estudos e Projetos - Projeto Básico Estrutural. Paraná, versão 2023.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO (CORSAN). **Quem Somos**. 2024. disponível em: <https://www.corsan.com.br/quem-somos>.

DIAS, N. G. **Avaliação da deterioração das estruturas de concreto de estações de tratamento de esgoto**. 2018. 203 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

DIAS, N. G.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Manifestações patológicas em estruturas de concreto de estações de tratamento de esgoto. **Concreto & Construção**. 110 ed. São Paulo: IBRACON 2023.

DOMICIANO, L. L. de S.; BARBOSA, T. R. **Estudo de durabilidade da estrutura de concreto armado em uma estação de tratamento de esgoto: caso de estudo na ETE Parque Atheneu**. 2020. 12 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/616>.

DYER, T. A. **Durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2015, p. 536.

FERREIRA, E. O. **Análise das propriedades ligadas à durabilidade dos concretos de ultra alto desempenho confeccionados com microssílica e cinza de casca de arroz**. 2022. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

FERREIRA, P. Personalidade Entrevistada. **Concreto & Construção**. 110 ed. São Paulo: IBRACON 2023.

FERREIRA, P. R. R. **Modelagem probabilística para previsão do tempo de iniciação da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado expostas em zonas de atmosfera marinha**. 2022. 245. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/24506>.

FILGUEIRAS, L.; XAVIER, L. Patologia de Estruturas Hidraulicas. **Concreto & Construção**. 110 ed. São Paulo: IBRACON 2023.

FONSECA, K. H. F. da. **Estudo do ataque por cloreto de sódio em concreto convencional**. 2020. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/3a0829eb-7ed0-4e6d-90b5-2dcc81d7d1fe/content>.

- GLÓRIA, R. M. **Estudo dos processos de formação, acumulação, emissão e oxidação em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. 2009. 65 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- GOBBI, A. et al. Deterioração do concreto em ETEs: caracterização do processo e meios de mitigação. **Concreto & Construção**. 110 ed. São Paulo: IBRACON, 2023.
- HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Reações expansivas deletérias no concreto. **Concreto & Construção**. 102. São Paulo: IBRACON, 2021.
- HOVER, K. C. Closing the Gaps. **Concrete Construction**, p.857-860, 1987.
- LEIFERT, S. O Concreto nas ETAS. Cases na SABESP. **Concreto & Construção**. 110 ed. São Paulo: IBRACON, 2023.
- LIMA, D. A. Tratamento de esgotos domésticos em reator anaeróbico híbrido (rah) seguido de Reator com Algas Imobilizadas (RAI). **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 8, n. 3, 270–285, ago. 2015.
- LUO, D. ZHOU, M., LI, F., & NIU, D. Chloride ion transport in coral aggregate concrete subjected to coupled erosion by sulfate and chloride salts in drying-wetting cycles. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, p. 3251-3267, 2024. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424007890>.
- LUZ, T. M. *et al.* Análise sobre ataques por sulfatos ao concreto de fundações. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 14, n. 4, p. 114- 127, 2022. Disponível em:
<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20653/209209217195>.
- MEDEIROS, M. H. F. de; ANDRADE, J. J. de O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. *In*: Isaia, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011, cap. 22.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MORAES, A. C. L. **Recorrência de Patologias em Processos de Ataque via Cloreto em Concreto Armado**. 2012. 230 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil e Materiais de Construção) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- MUMBERGER, F. B.; TUTIKIAN, B. F.; BOLINA, F. L. Proposed durability parameters for reinforced concrete structures with design service life between 50 years and 100 years in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 6, 2022.

NONAT, A. Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. *In*: CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Eds.). **Durabilidade do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2014, cap. 2.

OLLIVIER, J.-P. ;TORRENTI, J.-M. Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. *In*: CASCUDO, O.; CARASEK, H. (Eds.). **Durabilidade do Concreto**. São Paulo: IBRACON 2014, cap. 3.

OURIVES, C. N.; ALMEIDA R. C. de. Reparo e Proteção de Estruturas de Estações de Tratamento de Efluentes com Sistema de Cristalização Integral. *In*: 58º Congresso Brasileiro de Concreto. **Anais [...]**. Belo Horizonte. 2016.

PIHLAJAVAARA, S.E. Background and principles of long-term performance of building materials. *Intl. Conf. Durab. Build. Mat. Comp., 1st. Proceedings [...]*. ASTM Special Technical Publication, Ottawa, n° 691, p. 5-16, 1978.

PONTES, V. C. P. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. 2019. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/17082>.

PORTELLA, C. S. A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos segundo a ABNT NBR 6118:2007 e expostos aos cloretos disseminados em névoa salina na Praia do Futuro, em Fortaleza–CE**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/37060>.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em estruturas de concreto Armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: ECAMPUS, 2014.

ROZIÈRE, E. *et al.* Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 12, p. 1188-1198, 2009. Disponível em: <https://hal.science/hal-01006757/file/ERAL.pdf>.

SANDRI, J. H. V. **Tratamentos de superfície para mitigar o ataque por ácido sulfúrico**. 2023. 244 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

SANTOS, H. R.; SILVA, A. de P.; CHAHUD, E. **Corrosão na Armadura em Estruturas de Concreto Armado Devido ao Ataque de Sulfatos**. Ponta Grossa: Editora Atena, 2021.

SANTOS, H. R.; SILVA, A. de P.; CHAHUD, E. Corrosão na Armadura em Estruturas de Concreto Armado Devido ao Ataque de Sulfatos. *In*: Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções – CINPAR, Fortaleza, 2021. **Anais [...]**. Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CINPAR.2021.006>.

SILVA FILHO, L. C. P. da. **Durabilidade do Concreto à ação de sulfatos**: análise do efeito de permeação da água e da adição de microsilica. 1994. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SOUSA, P. A. de; ESTEVES, H. C. Corrosão e degradação em estruturas de concreto. **Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da FAIT**, 2021. Disponível em: http://fait.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/8m9c7uw3lQCzx2u_2021-8-30-15-22-37.pdf.

SOUSA, R. M. L. et al. Estudo da qualidade do agregado miúdo utilizado na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, e420101422295, 2021. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/22295>

SOUZA, D. J. de; MEDEIROS, M. H. F. de; HOPPE FILHO, J. Evaluation of external sulfate attack (Na₂SO₄ and MgSO₄): Portland cement mortars containing siliceous supplementary cementitious materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 4, 2020.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 1997.

WANG, K.; GUO, J.; YANG, L. Effect of dry–wet ratio on sulfate transport-reaction mechanism in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124418, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124418>

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Odor Control in Wastewater treatment Plants. **Manual of practice nº 2**. New York: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, n. 82, 1995.

ZHANG, C.-L. et al. Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 285, p. 122806, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122806> :

ZHAO, R.; LI, C.; GUAN, X. Advances in Modeling Surface Chloride Concentrations in Concrete Serving in the Marine Environment: A Mini Review. **Buildings**, v. 14, n. 6, p. 1879, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/6/1879>.