



**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ATUAIS DA ESTRUTURA E
MICROESTRUTURA DO CONCRETO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE
ESGOTO DE PINHEIROS**

SÃO PAULO

2020



NATÁLIA LINHARES
SILVIA LEME PEIXOTO BENITES
WILLIAN MARCILIO DE FREITAS

**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ATUAIS DA ESTRUTURA E
MICROESTRUTURA DO CONCRETO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE
ESGOTO DE PINHEIROS**

Projeto de pesquisa desenvolvido para futuro desenvolvimento do Trabalho de Conclusão do Curso de Pós Graduação em Patologia nas Obras Civis para obtenção do grau de especialista.

Prof. Orientador: Luis César S. De Luca, M.Sc.

SÃO PAULO

2020

LISTA DE BREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BOE	Bactérias Oxidantes de Enxofre
BOEA	Bactérias Oxidantes de Enxofre Acidófilas
BOEN	Bactérias Oxidantes de Enxofre Neutrófilas
BRE	Building Research Establishment
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
C ₃ A	Aluminato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio (Portlandita)
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CCMI	Corrosão do concreto microbiologicamente induzido
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo antigo Centro tecnológico de saneamento básico
Cl ⁻	Íons cloreto
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
EEE	Estação Elevatória de Esgoto
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe ³⁺ O(OH)	Oxi-hidróxido de ferro
H ₂ S	Gás sulfídrico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
K ₂ O	Óxido de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgSO ₄	Sulfato de magnésio
Na ₂ O	Óxido de sódio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio

NaOH	Hidróxido de sódio
O ₂	Oxigênio
RAA	Reação álcali-agregado
SABESP	Companhia de saneamento básico do estado de São Paulo
SO ₃	Óxido sulfídrico
SO ₄ ⁻²	Íons sulfato
TEG	Thaumasite Expert Group
TSA	Thaumasite sulfate attack (ataque sulfato com formação de thaumasita)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	13
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3. JUSTIFICATIVAS	13
1.4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES.....	15
2.2. DURABILIDADE E VIDA UTIL	17
2.3. AGRESSIVIDADE DO AMBIENTE	18
2.4. CONCEITO DE PATOLOGIA DO CONCRETO	19
2.5. DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS.....	21
2.6. DEGRADAÇÃO POR AÇÕES QUÍMICAS	22
2.6.1. CORROSÃO POR LIXIVIAÇÃO.....	22
2.6.2. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA).....	23
2.6.3. ATAQUE POR ÁCIDO	24
2.6.4. ATAQUE SULFATO.....	24
2.6.5. TAUMASITA.....	26
2.7. BIODETERIORAÇÃO.....	27
2.8. ENSAIOS	29
2.8.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	29
2.8.2. CARBONATAÇÃO.....	31
2.8.3. PETROGRAFIA.....	33

2.8.4.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	36
3.	ESTUDO DE CASO – ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO	40
3.1.	SISTEMA DE ESGOTOS SANITÁRIOS	40
3.2.	SISTEMA DE INTERCEPTAÇÃO PINHEIROS	41
3.3.	A ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO PINHEIROS	42
3.1.	HISTÓRICO.....	43
3.1.1.	ANÁLISE VISUAL DA ESTRUTURA.....	43
3.1.2.	RELATÓRIO 2014	44
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.1.	HIPÓTESE	48
4.2.	FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTO	49
4.3.	ENSAIOS	51
4.3.1.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E CARBONATAÇÃO	51
4.3.2.	PETROGRAFIA.....	54
4.3.3.	MICROSCOPIA DE VARREDURA (MEV).....	60
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	65
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
7.	ANEXO A – Fotos da EEE Pinheiros	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classes de agressividade ambiental.	19
Figura 2 – Classificação das causas dos processos de deterioração das estruturas de concreto.	21
Figura 3 – Escala de Indicador de pH	32
Figura 4 – Estágios Progressivo de Investigação Petrográfica.....	34
Figura 5 – Exemplo de Microscópio Petrográfico	35
Figura 6 – Representação Esquemática do MEV	37
Figura 7 – Fluxo do sistema de esgotamento sanitário	41
Figura 8 – Vista externa da EEE Pinheiros	42
Figura 9 – Situação do poço úmido em 2014.....	45
Figura 10 – Arrancamento do concreto com a mão em um dos pilares da estrutura	47
Figura 11 – Parede do vertedouro com concreto deteriorado e armadura corroída	48
Figura 12 – Fluxograma das principais hipóteses	50
Figura 13 – Croqui Esquemático de Paredes / Lajes e sua Localização	52
Figura 14 – Amostra testemunho 1	55
Figura 15 – Amostra testemunho 3	55
Figura 16 – Descrição de evidências patológicas identificadas nas amostras dos testemunhos de concreto.....	58
Figura 17 – Testemunho 1 – Primeira camada de alteração.....	59
Figura 18 – Testemunho 1 – Topo do testemunho.....	59
Figura 19 – Testemunho 1 – Nível Inferior da amostra	60
Figura 20 – Testemunho 3 – Zona de transição	60
Figura 21 – Áreas amostra 1.....	61
Figura 22 – Áreas amostra 2.....	61
Figura 23 – Análise EDS da área 1 da amostra 1	62
Figura 24 – Análise EDS da área 2 da amostra 1	62
Figura 25 – Análise EDS da área 3 da amostra 1	62
Figura 26 – Análise EDS da área 4 da amostra 1	63
Figura 27 – Análise EDS da área 1 da amostra 2	63

Figura 28 – Análise EDS da área 2 da amostra 2	63
Figura 29 – Análise EDS da área 3 da amostra 2	64
Figura 30 – Análise EDS da área 4 da amostra 2	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos mais adequados para determinação dos tipos de manifestações patológicas e a qualidade nas análises de cada ensaio	39
Tabela 2- Ensaio de resistência a compressão laboratório A	53
Tabela 3- Ensaio de resistência a compressão laboratório B	53
Tabela 4 - Descrição microscópica da matriz dos testemunhos de concreto	57

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Vista Interna da EEE Pinheiros.....	73
Foto 2 – Condição da parede do vertedouro.....	73
Foto 3 – Condição da barra de aço da estrutura	73
Foto 4 – Condição da laje superior da estrutura	73
Foto 5 – Parede mais interna da EEE Pinheiros	73
Foto 6 – Vista interna da EEE Pinheiros	73

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é atualmente o material mais utilizado na construção de obras de saneamento. Seja em obras de E.E.E – Estações Elevatórias de Esgoto, E.T.E. – Estações de Tratamento de Esgoto e até mesmo na fabricação de tubos para redes de saneamento.

Apesar da grande evolução em tecnologias para concreto, ainda é muito comum o surgimento de manifestações patológicas durante o período de vida útil das estruturas, principalmente em ambientes de grande agressividade.

A certeza é de que o concreto, como material de construção, é instável ao longo do tempo, sofrendo alterações em suas propriedades físicas e químicas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente. As consequências destes processos de alteração que comprometem o desempenho de uma estrutura, ou material, costuma-se chamar deterioração. Os elementos agressores, em si, são designados agentes de deterioração. (SOUZA e RIPPER, 1998).

Vicente Custódio Moreira de Souza e Thomaz Ripper mencionam que os mecanismos deletérios ao concreto podem ser de natureza química, física, mecânica ou biológica. As causas químicas podem ser causadas por fatores internos ao material – como as reações álcali-agregados – ou externas, como a ação dos íons agressivos – cloretos, sulfatos, dióxido de carbono, dentre outros. Fatores físicos são resultantes da ação da variação de temperatura externa, as diferenças de coeficientes de dilatação térmica entre agregados e pasta, além de gelo e degelo. As causas mecânicas são causadas por impacto, abrasão, erosão ou cavitação¹ do material. Os processos biológicos resultam do ataque químico de ácidos causados pelo crescimento de raízes de plantas ou de algas que se instalem em fissuras ou grandes poros do concreto, por ação de fungos ou pela ação de sulfetos presentes nos esgotos.

¹ Cavitação: Fenômeno de vaporização de um líquido pela redução da pressão, durante seu movimento.

Em uma estação de elevatória de esgoto, a exposição do concreto a um ambiente agressivo é extremamente alta, classe IV, conforme a NBR 6118², tornando-se vulneráveis a agentes agressores. Por esta razão Souza e Ripper complementam dizendo ser imprescindível conhecer o meio ambiente onde a estrutura estará inserida para compreensão do seu comportamento, visto que se criam condições necessárias para diminuir sensivelmente a vida útil das estruturas.

A fim de abordar, de maneira científica, o comportamento e os problemas das estruturas, foi desenvolvido um novo campo da engenharia das construções que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas, designado genericamente por Patologia das Estruturas. (SOUZA e RIPPER, 1998).

Diante desses fatores, será realizado o projeto de pesquisa propondo estudar as características atuais da estrutura e as possíveis causas da deterioração da Estação Elevatória de Esgoto de Pinheiros, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), através da análise de resultados de ensaios realizados e pesquisa bibliográficas.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Quais as principais características atuais da estrutura e microestrutura do concreto da Estação Elevatória de Esgoto de Pinheiros?

1.2. OBJETIVOS

Neste item serão abordados os objetivos geral e específico desta pesquisa.

²ABNT, Norma Brasileira. NBR 6118 / 2014 – Projeto de Estrutura de Concreto – Procedimento. São Paulo, Julho 2019, p. 17.

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Determinar as características atuais da estrutura e microestrutura do concreto da Estação Elevatória de Esgoto de Pinheiros.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar as possíveis causas da deterioração do concreto na Estação Elevatória de Esgoto de Pinheiros com base nos resultados dos ensaios.

1.3. JUSTIFICATIVAS

Durante muito tempo, a preocupação com a durabilidade das construções ficou em segundo plano. Atualmente, porém, percebe-se um crescente número de pesquisas com foco nas manifestações patológicas, consequência da importância do tema no cenário da construção civil.

As estruturas de concreto não são eternas, pois com o passar do tempo, se deterioram. Se não são bem projetadas de acordo com a agressividade do meio e com sua finalidade, bem executadas conforme especificações e submetidas a uma manutenção preventiva, não irão alcançar a vida útil de projeto.

As manifestações patológicas nas construções são as principais adversidades que afetam a vida útil das estruturas. Tais anomalias podem ser consequências de problemas de projeto, como cobrimento das armaduras abaixo dos valores mínimos recomendados pelas normas da ABNT, erro no traço do concreto, erros de execução da estrutura e o fato de que o meio ambiente em que a estrutura se encontra possa conter agentes agressivos à armadura e ao concreto.

Por estes motivos, compreender as manifestações patológicas ocorridas na Estação de Elevatória de Esgoto Pinheiros é de suma importância, visto os inúmeros agentes agressivos responsáveis pela deterioração do concreto, a fim de verificar a possibilidade da reabilitação da estrutura.

Além da necessidade técnica em se descobrir o agente causador desta degradação, têm-se o agravamento quanto a estanqueidade do sistema e os riscos ambientais e à saúde pública que a falta disto pode ocasionar. Existe a preocupação com o solo e o lençol freático do entorno, tal como a paralisação de uma Estação Elevatória de Esgoto que requer logística minuciosa e não permite paradas com grande espaço de tempo. O não reconhecimento do problema em questão pode levar ao colapso da estrutura, causando danos graves e extensos de alto custo para reparo ou substituição.

1.4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a realização do projeto de pesquisa, será realizada uma revisão bibliográfica, utilizando pesquisas em livros técnicos de autores especialistas, que permitirá compreender a deterioração do concreto em ambientes agressivos, origem das manifestações patológicas, mecanismos de degradação e meios de prevenção ou mitigação.

Paralelamente será realizado o Estudo do Caso da Estação Elevatória de Esgoto Pinheiros, utilizando relatórios, projetos, ensaios e análise de manifestações patológicas existentes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresentará a fundamentação teórica para atingir os objetivos propostos, iniciando por concreto e suas propriedades, passando pelos conceitos de durabilidade, vida útil das estruturas e agressividade do ambiente, apresentando patologia do concreto, deterioração das estruturas e suas degradações químicas e biológicas, além de pontuar os ensaios existentes para analisar as manifestações patológicas da estrutura em estudo.

2.1. CONCRETO E SUAS PROPRIEDADES

O concreto é o material da construção civil mais utilizado para a construção de estruturas em todo o mundo.

O concreto é um material utilizado na construção civil composto por agregados graúdos (pedras britadas, seixos rolados), agregados miúdos (areia natural ou artificial), aglomerante (cimento), água, adições minerais e aditivos (aceleradores, retardadores, fibras, corantes) (PORTO e FERNANDES, 2015).

O concreto de Cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada vez mais frequentes nos concretos atuais. (HELENE e ANDRADE, 2010).

Para que uma estrutura tenha resistência em relação aos agentes agressivos, ela depende das propriedades do concreto e da sua capacidade de dificultar a penetração dos agentes.

Com isso o autor Luca Bertolini (2005), em seus estudos menciona os fatores que podem influenciar a resistência do concreto à penetração dos agentes agressores:

- ✓ Relação água cimento (a/c): é o fator chave para determinar a porosidade capilar³ da pasta do composto do cimento e assim, a resistência à penetração dos agentes agressivos;
- ✓ Tipo de cimento e adições: as adições pozolânicas ou de escória de alto-forno⁴ podem melhorar claramente a resistência à penetração dos íons agressivos (em particular, os íons de cloreto (Cl^-) e íons de sulfatos (SO_4^{2-})); os cimentos compostos têm, além disso, efeitos benéficos em relação ao ataque por sulfatos e à reação álcali-agregados e são caracterizados por um baixo calor de hidratação;
- ✓ Cura: uma cura inadequada impede a hidratação do cimento e leva a uma porosidade capilar elevada, sobretudo no concreto de cobrimento; os cimentos compostos são mais sensíveis que o Portland, aos efeitos de uma cura de má qualidade;
- ✓ Teor de cimento: o aumento do teor de cimento, para uma determinada relação de água/cimento (a/c), permite o emprego de maior quantidade de água na massa e, assim, maior mobilidade interna do material, todavia um aumento da dosagem de cimento pode favorecer a fissuração devido ao calor de hidratação ou contração higrométrica⁵, ou ainda devido à reação álcali-agregado;
- ✓ Aditivos: os superfluidificantes são indispensáveis para obter um concreto trabalhável, caso requeira uma baixa relação a/c para garantir a resistência à compressão ou os requisitos de durabilidade;
- ✓ Consistência: a trabalhabilidade do concreto deve ser especificada na fase do projeto, para evitar o risco de má compactação ou de acréscimo de água no canteiro de obra;
- ✓ Resistência à compressão: além de ser requeridas por razões estruturais, está correlacionada às exigências de durabilidade;

³ Porosidade Capilar: processo de exsudação no concreto, ocasionando vazios na peça.

⁴ Adições pozolânicas ou de escória de alto-forno: são adições que proporcionam concretos cada vez mais resistentes e duráveis.

⁵ Contração Higrométrica: Contração devida a variação de umidade da peça.

- ✓ Adensamento do concreto na Obra: A durabilidade de uma estrutura pode ser garantida somente se o concreto for corretamente misturado, transportado e vibrado; o requisito de uma alta moldabilidade do concreto permite tornar o material menos sensível aos efeitos da qualidade da mão de obra; analogamente, todas as práticas de canteiro de obras que garantam a obtenção de um concreto bem adensado e bem curado, são indispensáveis para não tornar vãs todas as prescrições formuladas na fase de projeto.

2.2. DURABILIDADE E VIDA UTIL

A qualidade do concreto, espessura da camada de cobrimento e o ambiente em que a estrutura está localizada são de suma importância para a vida útil do projeto.

A norma NBR 8681⁶ – Ações e Segurança nas Estruturas – junto com a NBR 6118 – Projetos de Estrutura de Concreto-Procedimentos, referem-se ao conceito de vida útil de projeto para obras de qualquer material de no mínimo 50 anos. Porém, em obras com maior importância social e estrutural podem chegar a serem projetadas para até 100 anos ou mais (HELENE, 1986). Já a norma inglesa, a BS 7543:2003 *Guide to durability of buildings and building elements, products and components*, adota valores ainda mais exigentes, que vão de 60 anos para edifícios e 120 anos para pontes, estádios, barragens e metrô. (NORMA BS 7543, 2003 apud Medeiros e col. 2011).

No início das construções em concreto (início do século XX) e até a década de 80 eram utilizados apenas o bom senso e a experiência do profissional, considerando a durabilidade claramente subjetiva (HELENE e col. 2011). Tal conceito de subjetividade advém por acharem que o concreto armado tinha durabilidade ilimitada e, portanto, não havia necessidade de preocupação com manutenções.

Porém, segundo o mesmo autor, pode-se afirmar que o estudo da durabilidade e dos métodos de previsão da vida útil das estruturas de concreto é fundamental para:

- ✓ Auxiliar na previsão do comportamento da estrutura de concreto armado em longo prazo, garantindo a segurança dela;

⁶ ABNT, Norma Brasileira. NBR 8681 / 2003 – Ações e Segurança nas Estruturas. São Paulo, Julho 2019, p. 03.

- ✓ Prevenir manifestações patológicas precoces nas estruturas, reduzindo riscos de fissuras, corrosões, expansões e outros danos nas estruturas;
- ✓ Contribuir para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas.

Consequentemente, uma construção durável implica em adotar um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção. As decisões dos detalhes do projeto deverão ser tomadas individualmente, de acordo com a qualidade do concreto, a espessura do cobrimento e os efeitos da agressividade do meio ambiente (SOUZA e RIPPER, 1998).

Pode-se dizer que a durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente, as condições de uso operacional e de manutenção. Com isso, uma mesma estrutura pode ter diferentes comportamentos, ou seja, diferentes durabilidades, uma vez que vários fatores interferem em sua vida útil.

2.3. AGRESSIVIDADE DO AMBIENTE

Torna-se essencial conhecer, avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente em que a estrutura está exposta, além de analisar o concreto e a geometria da estrutura, estabelecendo uma relação entre agressividade do meio *versus* a durabilidade da estrutura de concreto, diz Helene (1983 apud Medeiros e col. 2011). Este é um dos fatores primordiais para a obtenção de uma vida útil prolongada da estrutura.

A agressividade do ambiente, sendo a poluição e as condições climáticas em que a estrutura está exposta como a umidade e a temperatura, relaciona-se diretamente com a sua degradação (BERTOLINI, 2010).

Sendo assim, é possível concluir que a resistência e durabilidade das estruturas são significativamente alteradas pela exposição ao ambiente, sendo este um dos agentes causadores de degradações no concreto e suas armaduras. Por isso, a NBR 6118:2014 classifica os níveis de agressividade do meio ambiente para as estruturas em quatro classes, as quais são apresentadas na Figura 1. A classificação da NBR 6118:2014 serve como referencial para especificações de projeto da estrutura, de acordo com o ambiente em que ela está localizada.

Figura 1 – Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1), 2)}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹⁾	Grande
		Industrial ^{1), 2)}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1), 3)}	Elevado
		Respingos de maré	

¹⁾ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

²⁾ Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

³⁾ Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Tabela 6.1 da NBR 6118:2014.

Especialistas da área de patologia estão elaborando novos parâmetros de classificação de agressividade, visto que as classificações ainda são insuficientes, deixando de atender áreas de grande relevância da construção civil - no caso desta pesquisa, os sistemas de saneamento.

Em uma estação elevatória de esgoto – EEE – a exposição do concreto aos agentes agressivos é Classe IV, sendo muito deletério ao material, devido ao microclima formado no interior por conter concentrações consideráveis de ácidos sulfúricos H_2SO_4 , responsável pela deterioração da estrutura de concreto (JR. KUDLANVEC; CANALLE; NUNES e col. 2018 apud HOPPE FILHO 2014).

2.4. CONCEITO DE PATOLOGIA DO CONCRETO

Por definição, concreto é um material heterogêneo, feito a partir da mistura de água, cimento, agregados miúdos e graúdos, podendo haver adições especiais. A fim de compreender melhor seu comportamento, serão analisados: a composição química deste material e suas características endurecidas, tal como suas fragilidades e desenvolvimento de problemas.

De acordo com Góis (2016), o concreto possui três fases: a pasta endurecida (matriz); o agregado e a fase de transição, sendo que a pasta endurecida é a mistura da água e do cimento Portland e somente este item pode ser constituído por diversos tipos de compostos químicos decorrentes da hidratação do cimento, sendo os principais silicatos hidratados (C-S-H) e os hidróxidos de cálcio (Ca(OH)₂).

O concreto é conhecido por sua prolongada durabilidade. Contudo, não pode ser considerado um produto perene, já que, em consequência da ação de agentes físicos, químicos e biológicos, torna-se propício a desgastes superficiais com o passar do tempo (SOUZA e RIPPER, 1998).

Os desgastes ocasionados em decorrência de tais agentes agressores tornam o concreto um material instável, modificando suas propriedades físicas e químicas, em função das características de seus componentes e das reações destes com o ambiente. Estes processos são responsáveis por alterações que podem comprometer o desempenho estrutural do material – alterações estas que também serão, ao longo deste estudo, denominadas como deterioração (SOUZA e RIPPER, 1998).

Procurando mitigar os problemas deletérios nas estruturas, que cada vez mais cedo vêm sofrendo com o processo de degradação, houve a necessidade do estudo que investigasse as falhas, os processos de degradação das estruturas e as suas causas:

Designa-se genericamente por Patologia das Estruturas esse novo campo da Engenharia das Construções que ocupa do estudo das origens, formas de manifestações, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação da estrutura (SOUZA E RIPPER, 1998, p. 14)

Referente as causas deletérias a uma estrutura, o autor Minos Trocoli de Azevedo (2011) expressa as seguintes falhas ao decorrer da vida útil da estrutura:

- ✓ Inadequações do projeto, com responsabilidade dos projetistas;
- ✓ Falhas construtivas relacionadas com a escolha dos materiais e sua aplicação, com responsabilidade do construtor;
- ✓ Falta de manutenção da estrutura ou utilização inadequada durante o uso da edificação, com responsabilidade do usuário;
- ✓ Ocorrência de fenômenos naturais imprevisíveis.

O conhecimento e entendimento das origens das causas das manifestações patológicas são imprescindíveis para o tratamento, pois permitem escolher a melhor forma de reparo, minimizando as chances de que a estrutura tratada não volte a sofrer danos (AZEVEDO, 2011). Souza e Ripper (1998) apresentam as causas de deterioração num quadro apresentado na figura 2 disposta abaixo.

Figura 2 – Classificação das causas dos processos de deterioração das estruturas de concreto.

• Causas intrínsecas (inerentes às estruturas) • Causas extrínsecas (externas ao corpo estrutural)	CAUSAS DOS PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS	• Falhas humanas • Causas naturais próprias ao material concreto • Ações externas
---	--	---

Fonte: Souza e Ripper, 1998.

Podemos dividir as causas de deterioração em duas: intrínsecas e extrínsecas. Entendemos por causas intrínsecas as que tem sua origem nos materiais ou peças estruturais durante as fases de execução e utilização, sejam por falhas humanas, por questões próprias ao material concreto ou por ações externas, inclusive acidentes. Por conseguinte, as causas extrínsecas são todas as causas externas ao corpo estrutural, durante as fases de concepção e ao longo da vida útil. (SOUZA e RIPPER, 1998).

2.5. DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS

O processo de deterioração do concreto é puramente químico segundo Souza e Ripper (1998) e ocorre quando um determinado elemento químico entra em contato e reage com a pasta de cimento, provocando reações de expansão ou dissolução do ligante. Esses dois mecanismos são altamente prejudiciais ao concreto, entretanto, Vicente Gentil (2007) pontua que a deterioração pode ser proveniente de fatores mecânicos, físicos, biológicos ou químicos.

Mehta (1986) acredita que raramente a degradação em concreto se dá por único fator, sempre há correlação de mais ações deletérias tão influentes que seria quase impossível separar causa e efeito em processos físico-químicos interrelacionados.

Levando-se em consideração que a estrutura analisada teve seu processo de construção totalmente monitorado por laboratório de controle tecnológico, presente em todas suas fases de concretagem e que a estrutura não sofreu nenhum tipo de choque mecânico ou importantes variações de temperatura, este trabalho dará enfoque aos aspectos ligados à degradação química e biológica do concreto, consideradas como causas extrínsecas, agindo durante a vida útil da estrutura.

2.6. DEGRADAÇÃO POR AÇÕES QUÍMICAS

Extremamente complexa, a ação por agentes químicos engloba diversos parâmetros. Os quais, segundo Ribeiro (2018), são muitas vezes difíceis de serem separados uns dos outros e atuando com diferentes gravidades. Exemplificando: uma pasta de cimento Portland em perfeito equilíbrio entre os componentes da matriz e seus poros com pH elevado. Qualquer ambiente que fragilize essa alcalinidade é um ambiente agressivo, pois acarretará uma desestabilização dos produtos hidratados.

Para Souza e Ripper (1998) pode-se classificar a corrosão do concreto segundo três tipos, dependendo das ações químicas que lhe deram origem: corrosão por lixiviação; corrosão química por reação iônica; e corrosão por expansão.

2.6.1. CORROSÃO POR LIXIVIAÇÃO

Lixiviação é um mecanismo preponderante de deterioração relativo ao concreto. Para Fabrício Longhi Bolina (et. al. 2019), trata-se de um processo que age por ações químicas, podendo ser encontrado em ataque ácido e ataque por sulfato. Esse processo produz mudanças nas propriedades intrínsecas do concreto, alterando sua aparência física e comportamento mecânico. Sobre tal processo, Souza e Ripper (1998) discutem a corrosão do concreto através do mecanismo de lixiviação por meio da dissolução e carreamento do Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), presente abundantemente

na pasta de cimento Portland. Esse carreamento se dá através da reação com águas puras, subterrâneas ou ácidas que acabam lavando a superfície do concreto, deixando os agregados expostos. Ainda para os autores, o processo de corrosão deve ser interrompido assim que observado, pois pode levar ao enfraquecimento da estrutura e pode, em estágio avançado, atingir um patamar economicamente impraticável à recuperação.

2.6.2. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

A reação álcali-agregado não ocorre pela penetração de agente agressivo, sua reação se dá entre os álcalis (Na_2O e K_2O), íons hidroxilas presentes na pasta do cimento e minerais reativos presentes em certos agregados, algumas sílicas amorfa e de natureza dolomítica, em presença de umidade, gerando gel higroscópico com expansão volumétrica que causa fissuração no concreto e permite entrada de agentes agressivos. Essa expansão e fissuração são apresentadas em forma mapeada em áreas não comprimidas, diminuindo a resistência mecânica e o módulo de deformação (RIBEIRO, 2018).

Bolina et. al. (2019) discorrem que quase não há o que fazer quando iniciada a RAA. Diversos profissionais optam pelo controle de temperatura e umidade, além de monitoramento permanente do elemento afetado, que se dá principalmente em fundações enterradas.

Segundo Bolina et. al. (2019), há três tipos de RAA em função da mineralogia dos agregados reativos envolvidos: (I) álcali-sílica, (II) álcali-silicato e (III) álcali-carbonato, embora diversos outros autores acreditem que a reação (III) não acontece em território nacional. Na reação álcali-sílica participam sílica reativa presente nos agregados e os álcalis do cimento, ocorrendo apenas em determinada temperatura e umidade. Já na reação álcali-silicato, sendo, para os autores, o tipo mais encontrado em território nacional, tem como agregado reativo principalmente quartzos e se apresenta de forma mais lenta e complexa. A reação álcali-carbonato ocorre de maneira diferente das outras, uma vez que seu agregado reativo tem como origem rochas carbonáticas.

2.6.3. ATAQUE POR ÁCIDO

Os ácidos são mais comumente encontrados em ambientes industriais e agem sobre o concreto convertendo os compostos cálcicos em seu ácido respectivo. Por exemplo, o ataque de ácido sulfúrico produz, em contato com concreto, sulfato de cálcio segundo Bolina et al. (2019). Nesse processo, a alcalinidade do concreto é gradativamente reduzida, pois são os compostos cálcicos seus mantenedores.

Há duas maneiras de degradação: no caso dos sais produzidos serem solúveis, a água carrega-os para fora da estrutura aumentando a porosidade. Em caso contrário, de não solúveis, porém expansivos, acarretam fissuração e deterioração do concreto. As consequências desse ataque são diminuição de pH e por consequência, despassivação da armadura e perda de seção por lixiviação. Ainda conforme os autores, o baixo teor de hidróxido de cálcio é um indicador de durabilidade do concreto frente a ataques ácidos. É, todavia, um composto necessário para a passivação da armadura. Águas de chuva são também fatores de ataque ácido. Essas águas em grandes centros urbanos são ricas em óxido de enxofre e anidrido carbônico, que conferem acidez a solução.

2.6.4. ATAQUE SULFATO

Com maior abundância na natureza, os íons sulfatos podem ser encontrados em águas naturais oriundos de dissolução de rochas e solos, tal como oxidação de sulfetos; já em águas com intervenções humanas os íons são oriundos de esgoto doméstico e efluentes industriais. Nas águas tratadas o uso de coagulante é o responsável pela presença destes íons, o que deve ser feito com cautela, pois a ingestão de sulfato pode desencadear efeito laxativo no ser humano. Em redes de esgoto sem adequada declividade, materiais orgânicos ficam depositados e transformam, pela ação das bactérias, o sulfato (SO_4^{2-}) em sulfeto (H_2S), exalando gás sulfídrico que promove problemas de corrosão dos coletores e odor, além de ser tóxico (CETESB, 2013).

Skalny (et al., 2002) afirma que minerais presente nos agregados - água de mistura, adições e aditivos, inclusive o próprio cimento Portland - podem ser fontes

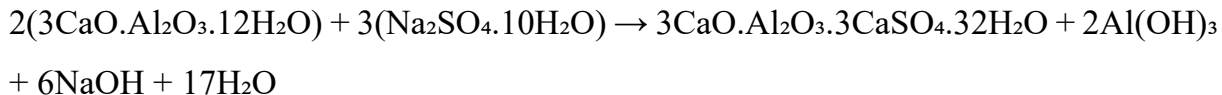
internas de sulfato; já para as prováveis fontes externas, além das supracitadas através da CETESP, o autor ressalta solos argilosos e águas marítimas.

Os sulfatos são extremamente agressivos e para Souza e Ripper (1998), causam a degradação total do concreto em um determinado período de tempo, sendo os principais de magnésio, cálcio, potássio, sódio e amônio. Ainda segundo os autores, quando transportado para dentro da estrutura de concreto formam sais chamado Sal de Candlot, também conhecido como etringita.

Intensidade do ataque é relacionado ao íon cátion associado ao radical sulfato (SO_4^{2-}) para Costa (2004) e a ordem de agressividade, do mais fraco ao mais agressivo seriam: sulfato de cálcio (CaSO_4), sulfato de sódio (Na_2SO_4), sulfato de magnésio (MgSO_4) e por último, o sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

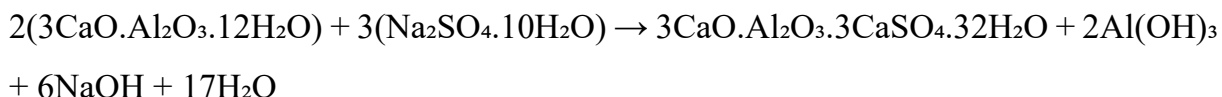
A.M. Neville (2016) descreve as equações das reações dos sulfatos com a pasta de cimento hidratada da seguinte maneira:

Sulfato de Cálcio:



O sulfato de cálcio ataca somente o aluminato de cálcio hidratado formando a etringita, sulfoaluminato de cálcio, formulado por $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$.

Sulfato de Sódio:



Esta reação configura ataque ácido. Em água corrente, o hidróxido de cálcio, formulado por $(\text{Ca})\text{OH}_2$, presente no concreto, pode ser lixiviado em grandes proporções. Entretanto, se o hidróxido de sódio (NaOH) se acumular na estrutura fará com que o equilíbrio seja alcançado, diminuindo assim a quantidade de óxido sulfídrico (SO_3) depositado em forma de gipsita, sulfato de cálcio hidratado.

Sulfato de Magnésio:



Já o sulfato de magnésio pode atacar tanto o aluminato de cálcio quanto o silicato de cálcio hidratado, assim como o hidróxido de cálcio. A pior consequência deste ataque é a desintegração do C-S-H, parte ligante do concreto.

Independentemente de sua fonte, os íons sulfato alteram a composição química e física do concreto. Sua interação com este compósito gera gipsita, etringita e de forma mais brutal, taumasita. Esses ataques podem ser expansivos e o aumento súbito de volume acarretam fissuras devido a esforços internos, facilitando assim entrada de mais agentes agressivos; ou também se manifestando em forma de lixiviação com perda progressiva de módulo de elasticidade, perda de massa, reduzindo sua seção transversal e consequentemente a tensão máxima admitida. Há outra maneira de ataque por sulfato ainda não muito bem compreendida. A esta denomina-se ataque sulfato com formação de taumasita (TSA) que se manifesta com redução de sua propriedade ligante, perda de resistência e se transforma numa massa sem coesão (BOLINA, 2019).

2.6.5. TAUMASITA

Taumasita é o produto de uma reação onde a substância consumida é a matriz cimentícia - a parte resistente do concreto, o C-S-H (silicatos cálcicos hidratados) - transformando-a em um material sem coesão e sem resistência, o que destoa da reação existente no processo de etringita, onde são os aluminatos cálcicos hidratados os afetados. Essa diferença é o que torna a taumasita mais agressiva que a etringita (COUTINHO, 2001).

Segundo N. J. Crammond (2003), para que ocorra o desenvolvimento deste fenômeno, é necessário baixas temperaturas, umidade relativa do ar alta, presença de sulfatos e presença de fonte de carbonato. Embora os autores sempre relatem a necessidade de baixa temperatura para o desenvolvimento da taumasita, Pinheiro-Alves, Gomà e Jalali (2007) apud Placido (2017) obtiveram resultados mais expressivos de

degradação em corpos de prova mantidos a temperatura de 20°C durante todo o ensaio com submersão em solução de sulfato de magnésio e sulfato de sódio.

A forma de mitigação do ataque ao sulfato é a redução do componente C3A (aluminato tricálcico) do cimento. Para este tipo, chamamos de cimento resistente a sulfatos. Esta opção só é eficaz para a etringita uma vez que este não é o composto afetado na taumasita e sim o C-S-H (PARKER, 1998). Indo em contrapartida, os cimentos resistentes a sulfatos tem maior teor de C-S-H depois de hidratado, o que nas condições apropriadas, associados a fontes de sulfato e de carbonato formam cristais translúcidos e moles com a fórmula descrita por $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$, a taumasita (COUTINHO, 2001).

Ainda segundo Joana de Sousa Coutinho (2001), o carbonato pode ser proveniente de fíler calcário, muito utilizado nos cimentos modernos. Para Dave Parker (1998), partículas agregadas e calcários grandes também podem ser considerados fontes de carbonatos e não apenas formas finamente divididas, o que inclui areias e britas com base calcárias.

Segundo o Thaumasite Expert Group (TEG) reportado pelo Professor L A Clark e o BRE (Building Research Establishment) no relatório revisado em 2002 (TEG Report: Review after three years experience), dois casos ocorreram em concreto enterrado onde o agregado era silicioso, portanto há possibilidade de que concreto sem presença de carbonato pode ser atacado por taumasita se houver fonte externa de íons carbonato, como, por exemplo nas águas subterrâneas.

2.7. BIODETERIORAÇÃO

Os processos biológicos de deterioração são provenientes de ataque ácido, ação de fungos ou sulfetos presente nos esgotos, sendo este último o principal ataque biológico. O gás sulfídrico (H_2S) presente nas redes de esgoto, dissolvido em água, descalcifica o concreto ao entrar em contato com o cálcio presente nos cimentos Portland, gerando assim o amolecimento da pasta (SOUZA E RIPPER, 1998).

Para Bolina et al (2019) além das causas supracitadas, ainda tem relevância as bactérias, algas e musgos, encontrados junto a umidade, pouca ventilação, zonas

marítimas e rede de esgostos, tendo como principal consequência a dissolução da pasta pela atividade metabólica dos microorganismos. Sanchez e Rosowsky (2008) *apud* Gois (2016) citam ainda como ataque biológico macroorganismos como moluscos e crustáceos e Ribeiro (2018) define biodeterioração como uma alteração não desejada nas propriedades de um material devido a atividade biológica, enquanto biodegradação, para Herisson (2012) *apud* Góis (2016) é uma alteração desejável.

Para estruturas destinadas a rede de esgoto, é fundamental o entendimento de dois tipos de bactérias, as redutoras de sulfato (BRS – anaeróbias) e as oxidantes de enxofre (BOE – aeróbias). Estas bactérias provocam uma deterioração bioquímica dissimilatória, quando os microorganismos excretam substâncias que reagem quimicamente com o material modificando suas propriedades. Quanto menor pH e maior turbulência nas águas residuais, maior será a emissão de H_2S produzido pelas BRS. Já as BOE são divididas em duas sub espécies: as neutrófilas (BOEN) que se desenvolve em pH mais básico e as acidófilas (BOEA) que se desenvolve em pH mais ácido, sendo a primeira pouco prejudicial ao concreto (GÓIS, 2016)

O principal mecanismo de deterioração das estruturas de saneamento é a corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) e acontece em 5 estágios de acordo com Sun (2015) sendo eles:

- I – As BRS convertem os íons sulfatos presente nos efluentes em $H_2S(aq)$;
- II – O $H_2S(aq)$, pouco solúvel e muito volátil, é liberado em forma gasosa $H_2S(g)$ tendo a turbulência como potencializadora na emissão do gás;
- III – As BOE presente na superfície úmida do concreto oxidam o $H_2S(g)$ e o transformam em ácido sulfúrico (H_2SO_4);
- IV – O ácido sulfúrico penetra nos poros do concreto e inicia o processo de descalcificação da portlandita e silicatos de cálcio hidratados, formando produtos expansivos como etringita e gipsita secundária;
- V – A medida que o ataque avança, os agregados ficam expostos e a estrutura perde seção gerando perdas severas.

Assim que a reação entre concreto e os ácidos começa a ocorrer, os compostos hidratados do cimento, o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio, começam a se dissolver, o ácido sulfúrico na superfície começa a entrar através dos

poros reagindo com os compostos por esse caminho, quando entra em contato com o C-S-H forma uma massa sílica sem qualquer coesão, já o contato com o hidróxido de cálcio forma o sulfato de cálcio - que posteriormente hidratado formará a gipsita que pode aumentar seu volume de 120 a 220%. Conforme a entrada de sulfato se intensifica, aumenta também a formação de gipsita que por sua vez reage com o aluminato de cálcio hidratado e forma então a etringita secundária que pode aumentar de volume de 227 a 700%. Esta, porém, não consegue manter estabilidade em ambientes com baixo pH e acaba por se transformar em gipsita nessas condições, apresentando-se mais no núcleo do concreto onde ainda tem pH elevado (GÓIS, 2016).

2.8. ENSAIOS

Para a análise correta de uma estrutura, assim como é feito na medicina, são necessários ensaios para que diversos pontos sejam avaliados com mais precisão. Para a estrutura objeto de estudo neste trabalho, os ensaios realizados foram: extração de testemunho para análise de resistência a compressão, determinação da espessura de carbonatação com fenoftaleína, análise petrográfica e microscopia eletrônica de varredura.

2.8.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

O ensaio de resistência a compressão axial tem como objetivo a aferição da resistência e o desempenho do concreto utilizado em obra, podendo avaliar a segurança estrutural de obras em andamento – durante o controle tecnológico – ou existente – sinais de deterioração do composto – em que a resistência a compressão do concreto deva ser conhecida.

A busca da resistência efetiva do concreto dentro de um elemento está relacionada a um método de ensaio específico que seja capaz de fazer com que a resistência obtida dos testemunhos extraídos se aproxime da resistência do concreto efetivamente lançado na estrutura. Essa resistência do concreto aplicado é necessariamente uma resistência estimada a partir de um corpo de prova normatizado.

Para isso existem duas classes de ensaios: os destrutivos, como por exemplo o ensaio de extração de testemunhos do concreto – método utilizado neste estudo –, e também os ensaios não destrutivos, que causam um dano mínimo a estrutura, como por exemplo, o ensaio de esclerometria (ALVES, 2017).

No Brasil a padronização de ensaios de compressão, a começar da extração, preparo, ensaio e análise é regido pelas NBR 5739/18 - Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos e a NBR 7680-1/15 – Concreto - Extração, Preparo, Ensaio e Análise de Testemunhos de Estruturas de Concreto, Parte 1 – Resistência à Compressão Axial.

O local para a extração de testemunhos em uma estrutura deve ser determinado por consenso entre o tecnologista de concreto, o construtor e o projetista da estrutura, de forma a reduzir os riscos de extração em locais inadequados.

A norma estabelece o diâmetro mínimo de um corpo de prova em 3 vezes o diâmetro máximo característico do agregado graúdo presente no concreto analisado, sendo igual ou superior a 100 mm. A extração deve ser precedida de uma verificação experimental do posicionamento das armaduras, como, por exemplo, com a utilização de um detector de metais (pacômetro). Em casos de elementos estruturais cuja concentração de armaduras torne inviável a extração de testemunho de diâmetro igual ou superior a 100 mm, sem danificar a armadura, permite-se a extração de testemunho com diâmetro igual a 75 mm – medida estabelecida nos ensaios deste trabalho (NBR 7680/15, HAMASSAKI e SANTOS, 2013).

A NBR 7680 faz as seguintes recomendações para extração dos testemunhos:

Para extrair testemunhos cilíndricos, deve ser empregado um conjunto de extratora provido de cálice e coroa diamantada, ou outro material abrasivo equivalente, que possibilite realizar o corte dos testemunhos com as dimensões estabelecidas, sem danificar excessivamente a estrutura. O equipamento deve possibilitar refrigeração à água do local do corte do concreto e minimizar vibrações, que devem ser evitadas para se obter paralelismo entre as geratrizes dos testemunhos extraídos e evitar ondulações em sua superfície” (NBR 7680/15).

A NBR 7680 instrui que os testemunhos devem ser íntegros, isentos de fissuras, segregação, ondulações, e não podem conter materiais estranhos ao concreto,

como pedaços de madeira. Testemunhos que apresentem defeitos como os citados devem ser descartados.

Já no ensaio de carga em laboratório normatizado pela NBR 5739 a carga de ensaio deve ser aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de 0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s. Se tratando de máquinas providas de indicação de carga analógica, o carregamento só deve cessar quando o recuo do ponteiro de carga for em torno de 10% do valor da carga máxima alcançada, que deve ser anotada como carga de ruptura do corpo-de-prova ou testemunho.

Feitas as anotações das cargas obtidas se faz necessário as devidas correlações com o auxílio de equações matemáticas descritas na NBR 7680 utilizando os coeficientes k_1 a k_4 em relação aos resultados de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, procurando aproximar os valores obtidos em laboratório com o concreto existente em *in loco*. (HAMASSAKI E SANTOS, 2013)

Alguns procedimentos podem influenciar no resultado da resistência a compressão. Com isto Bertoline explica:

A característica do concreto que influencia o valor da resistência é principalmente a umidade: em uma amostra saturada, pode-se obter valores 10% ou 15 % inferiores aos de uma amostra seca (...) todavia, este resultado é um índice importante da quantidade da aplicação do concreto. As variáveis que podem influenciar o ensaio são numerosas; as mais significativas são: o diâmetro do testemunho (a resistência geralmente diminui quando aumenta a dimensão da amostra), a posição e a direção da extração do testemunho, a ação da extração (que pode danificar o concreto) a planeza da superfície de ensaio, (BERTOLINE, 2010).

2.8.2. CARBONATAÇÃO

O CO_2 (gás carbônico) presente no ar atmosférico é transportado pelos poros do concreto para dentro da estrutura, reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na água de hidratação do concreto formando carbonato de cálcio (CaCO_3). Este processo diminui o pH interno do concreto, o que não é prejudicial para o concreto em si, aumentando sua resistência superficial. O problema acontece se essa espessura de carbonatação chega na zona de armadura, pois o pH básico é o que garante o filme de

passivação, não permitindo o desencadeamento do processo de corrosão das armaduras, o que não ocorre em meio ácido (SOUZA E RIPPER, 1998).

As principais aplicações práticas deste ensaio são para verificação e/ou orientação quanto a:

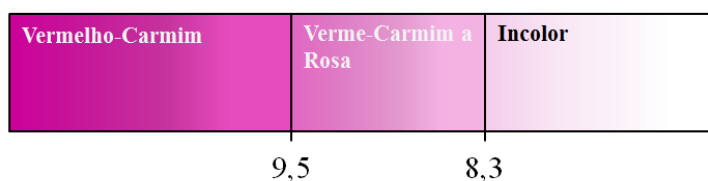
- Intensidade de prováveis processos de queda de alcalinidade no concreto;
- Regiões passíveis de instalação de processos de oxidação de armaduras, decorrente da queda de alcalinidade do concreto na espessura o qual as armaduras encontram-se inseridas.

O ensaio para determinar a profundidade de carbonatação é um método semi-destrutivo, com um pequeno dano localizado. Faz-se uma fratura no concreto para acessar suas camadas mais internas, borrifa-se a solução de fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) que apresentará coloração vermelho carmim em contato com meio básico e incolor em meio ácido, demonstrando assim a perda do pH inicial do concreto nas áreas onde a solução permanecer incolor e permitindo determinar a espessura de carbonatação e sua distância até a armadura (BOLINA ET AL, 2019).

Visando determinar visualmente a profundidade na qual ocorre a mudança de coloração do indicador e a faixa de pH do substrato, apresenta-se na Figura 3, assim como descrito abaixo:

- **Vermelho-carmim** para valores de pH superiores a 9,5;
- **Rosa a vermelho-carmim** para valores de pH entre 8,3 e 9,5;
- **Incolor** em pH inferior a 8,3.

Figura 3 – Escala de Indicador de pH



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.8.3. PETROGRAFIA

A análise petrográfica encontra-se cada vez mais sendo difundida na Engenharia Civil. Um ensaio que antes era utilizado pelos geólogos, hoje tem grande importância para a descoberta do comportamento do composto - no caso deste trabalho, o concreto.

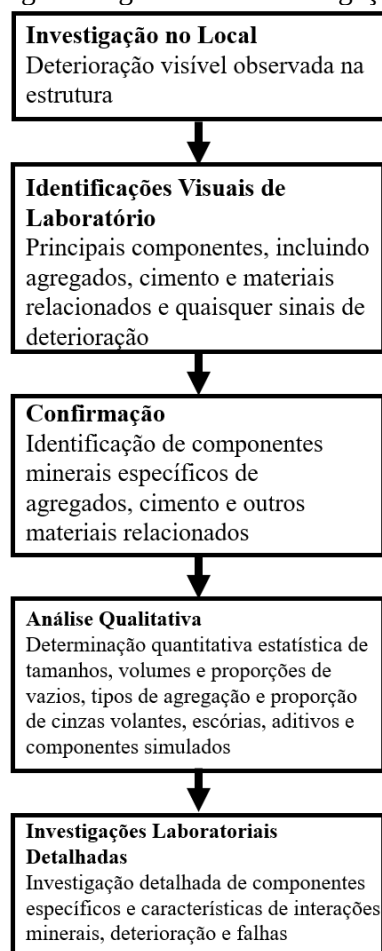
O termo de Petrografia para a Geologia significa o estudo das seções finas de rochas. Esta análise também é uma ferramenta valiosa para determinar a qualidade do concreto.

Procurando ilustrar a dinâmica de investigação, o Professor D. Matthew Stuart, elaborou um fluxograma, retratado na Figura 4, com os estágios progressivos de uma investigação petrográfica, onde apresenta o nível de aumento da avaliação dependendo da quantidade de informações necessárias.

Não há uma norma brasileira específica para modo de execução de ensaios de Petrografia. Porém, utiliza-se a norma americana, *American Society for Testing and Materials*, ASTM C856 – *Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*, que abrange as qualificações de um petrógrafo de acordo com a Seção 4. 2. Os objetivos do exame de acordo com a Seção 5. 3. Os tipos e uso de equipamento sob as Seções 6 e 7. 4. A preparação de amostras nos termos das seções 8 e 10. 5. O exame das amostras nos termos da Seção 9 e 6. A preparação do relatório sob a Seção 14. Também inclui um apêndice sobre técnicas para detectar gel de sílica alcalina – composto apresentado em sintomas de Reação Álcali agregado RAA (STUART, 2016).

Para a preparação da amostra Bertoline (2010) explica que os materiais cimentícios devem ser reduzidos a uma “seção fina” com uma espessura na ordem de 30 μm à 40 μm dependendo do material. A preparação das amostras é feita em laboratório, reduzindo o material em uma fatia finíssima e colocada sobre um vidro e posteriormente realizado o adelgaçamento por remoção mecânica da seção excessiva da amostra.

Figura 4 – Estágios Progressivo de Investigação Petrográfica



Fonte: D. Matthew Stuart (2016). Tradução realizado pelos autores

Para a análise de alguns materiais como o composto de cimento, podem-se usar corantes ou substâncias fluorescentes, que quando absorvidas pela amostra, evidenciam detalhes como microporos, fissuras na interface agregados-pasta de composto de cimento e fendas. (BERTOLINI, 2010)

A avaliação petrográfica no microscópio óptico de uma amostra de concreto fornece uma imagem real e com isto se pode determinar o tipo e tamanho do agregado, profundidade de carbonatação, conteúdo de vazios de ar ou água, evidência de excesso de água, retemperação⁷ e modo de deterioração. Os resultados obtidos desta análise podem ajudar a estabelecer a qualidade do concreto e até mesmo auxiliar na escolha do

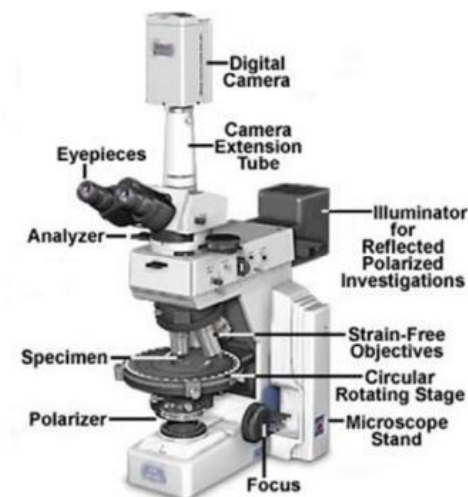
⁷ Retemperação: Adição de água ou cimento após a mistura, geralmente realizada para recuperar a trabalhabilidade do concreto.

melhor método de reparo e proteção dada uma deterioração (STUART, 2016). Segundo Bertolini,

A ampliação completa do microscópio é dada pelo produto da ampliação pela objetiva com a da ocular. Nos Microscópios ópticos tradicionais, as ampliações podem variar de 10 vezes a 1.000 vezes. É preciso, porém, atentar para o fato de que a ampliação não significa resolução. (BERTOLINI, 2010)

Na figura 5 abaixo é possível observar um exemplo de microscópio polarizador que é utilizado para realizar análises das amostras.

Figura 5 – Exemplo de Microscópio Petrográfico



Fonte: Stuart, 2020.

Por meio do ensaio qualificado de Petrografia pode-se oferecer os serviços de exame microscópico de núcleos, determinação da relação água/cimento e presença de excesso de água, análise por difração de raios-x do material em pó, análise química, incluindo conteúdo de sulfato e cloreto entre outros, análise de absorção e a presença de agregados potencialmente reativos (STUART, 2016).

Embora a observação microscópica permita estudar inteiramente a capacidade morfológica do material, normalmente se faz necessário proceder a uma observação detalhada cada vez menor, com dimensões que vão da escala micrométrica

até a manométricas ou a subnanométrica, para garantir a eficácia dos resultados. (BERTOLINI, 2010)

Com isto é preciso recorrer a instrumentações que tenham tais poder de resolução e, para uma melhor compatibilização dos ensaios, se faz necessário uma combinação de componentes ópticos e exame de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que permite que seja verificado os mecanismos responsáveis pela deterioração do concreto (STUART, 2016).

2.8.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O limite físico do poder de resolução do microscópio óptico é ligado ao comprimento de onda da luz empregada. O poder de resolução cresce proporcionalmente à redução do comprimento de onda da radiação empregada. De acordo com a teoria ondulatória-corpúscular, os elétrons podem ser considerados radiação de baixíssimo comprimento de onda e, assim, se utilizados como fonte em um microscópio, permitem obter poderes de resolução bastante elevados. Dependendo do comportamento dos elétrons do feixe incidente – se interagem com a superfície da amostra ou se a atravessam –, fala-se de microscópio eletrônico de varredura (SEM, *Scanning Electron Microscope*), (BERTOLINI, 2010).

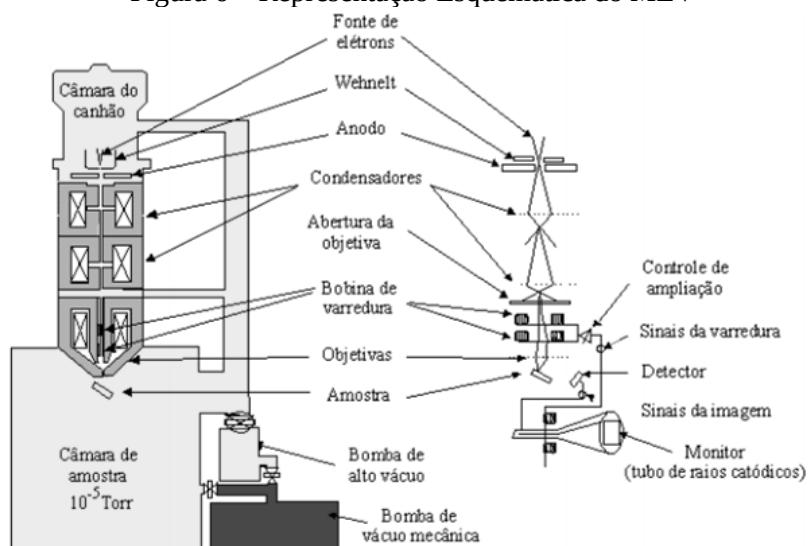
O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) se tornou um instrumento imprescindível nas mais diversas áreas: eletrônica, geologia, ciência e engenharia dos materiais, ciências da vida, entre outros. Em particular nos estudos de análise de quadros patológicos em obras civis.

Há duas técnicas mais utilizadas para análise de material: a Microscopia Óptica – apresentada no capítulo anterior como Petrografia – e a Eletrônica (MALISKA, s.d).

Com isso, para realização do ensaio de MEV utiliza-se um microscópio eletrônico de varredura, visto na Figura 6, que realiza a aceleração dos feixes de elétrons após atravessar uma série de lentes eletromagnéticas que desempenham o papel de reduzir sua dimensão, de modo a obter um diâmetro da superfície da amostra na ordem de nanômetro, garantindo assim uma elevada resolução do composto estudado. O MEV ainda permite a possibilidade do movimento sincronizada do pincel de excitação dos

elementos flutuantes do monitor, garantindo assim a visualização das imagens, deste sistema criação da imagem vem o termo “de varredura”. (BERTOLINE, 2010)

Figura 6 – Representação Esquemática do MEV



Fonte: <http://www.biomaterial.com.br/capitulo7part01.pdf>

Diferentemente da microscopia óptica que permite uma ampliação do material em apenas 1.000 vezes o MEV pode aumentar aproximadamente 300.000 mil. Sua resolução pode variar, em condições da capacidade do equipamento e material amostral.

Os sinais comumente utilizados em microscopia eletrônica por varredura para criar as imagens são principalmente dois: os elétrons secundários e os retrodifusos (backsattered). Os elétrons secundários (sinal, Secondary Electron Imaging) provem de uma profundidade de poucos nanômetros e são os que permitem obter a máxima resolução. Os elétrons secundários fornecem informações sobre a topografia das superfícies. A imagem fornecida por estes elétrons é de fácil interpretação, porque é igual à óptica (BERTOLINI, 2010)

Entretanto, não são apenas estas características de análise elevadas de profundidade e foco (imagem com aparência tridimensional) que fazem do MEV uma ferramenta tão importante e tão usada na análise dos materiais. A possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química elementais qualitativa e

quantitativas da amostra são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica.

Bertolini explica que para a diferenciação de compostos químicos é utilizado outro tipo de raio - os raios X característicos:

Um outro sinal gerado pela interação entre feixe eletrônico e a amostra é constituído por raios X característicos. Os raios X característicos têm energia, ou comprimento de onda equivalente, característica dos elementos presentes no ponto ou na área de interação. Coletando e analisando os raios X com espectrômetros adequados, obtêm-se informações sobre elementos presentes na amostra. Com este tipo de sinal, podem ser conduzidas análises químicas elementais qualitativas e quantitativas (BERTOLINI, 2010)

Este método tem por finalidade analisar e identificar a presença de compostos oriundos da degradação da estrutura do concreto, bem como da massa cimentícia, por ação do ataque químico por sulfeto, sulfato e carbonatação, (MALISKA, s.d).

A fim de determinar a origem da deterioração com concreto da estação elevatória de esgoto – fonte do estudo deste trabalho –, foram realizados os dois estudos microscópicos mencionados (Petrografia e MEV).

O D. Matthew Stuart em seu estudo elaborou uma tabela com os métodos mais adequados para determinação dos tipos de manifestações patológicas e a qualidade nas análises de cada ensaio. A fim de determinar a origem da deterioração com concreto da estação elevatória de esgoto – fonte do estudo deste trabalho –, foram realizados os dois estudos microscópicos mencionados (Petrografia e MEV), estes dois ensaios serão primordiais para o êxito da pesquisa conforme demonstrado na tabela 01.

Tabela 1 - Métodos mais adequados para determinação dos tipos de manifestações patológicas e a qualidade nas análises de cada ensaio

Causas de Deterioração	Faixas Moídas / Polida	Microscópio de Seção Fina	Microscopia de Luz Refletida	Microscópio Fluorescente	MEV - Microscópio de Micro Varredura	Método de Difração por Raio X	Análise Térmica	Análise Química
Ataque Químico	AR	PE	-	-	PE	AR	-	-
Etringita Tardia	TR	PE	-	-	PE	AB	-	-
Reação Agregados	TR	PE	-	-	AB	-	-	-
Ataque por Cloretos	AR	PE	-	-	PE	AB	-	AE
Carbonatação	AE	PE	-	-	AE	-	AB	
Corrosão da Armadura	-	PB	-	AE	AE	-	-	AR
Ataques por Sulfatos	AB	PE	-	AE	AE	AB	-	AB
Reação de Sílica Alcalina / Reação de álcali-carbonato	AE	PE	-	-	AE	-	-	-
Danos por Geadas	PE	AE	PE	AE	-	-	-	-
Danos por Fogo	TB	PE	-	AE	-	-	-	-
Mão de Obra	PE	PE	-	AE	-	-	-	AB

Método de Identificação de Componentes

T = Tentativa
P = Primário
A = Alternativo

Qualidade de Identificação

E = Excelente
B = Boa
R = Razoável
M = Mau

Fonte: Stuart, 2016

3. ESTUDO DE CASO – ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO

Apresenta-se neste capítulo um breve explicativo do funcionamento de estação elevatória para que possa ser melhor compreendido o caso da EEE Pinheiros, assim como dados importantes do local, funcionamento, geometria e dados de projeto, tal como ações tomadas anteriormente a deterioração da estrutura a fim de criar uma *anamnese* da estrutura.

3.1. SISTEMA DE ESGOTOS SANITÁRIOS

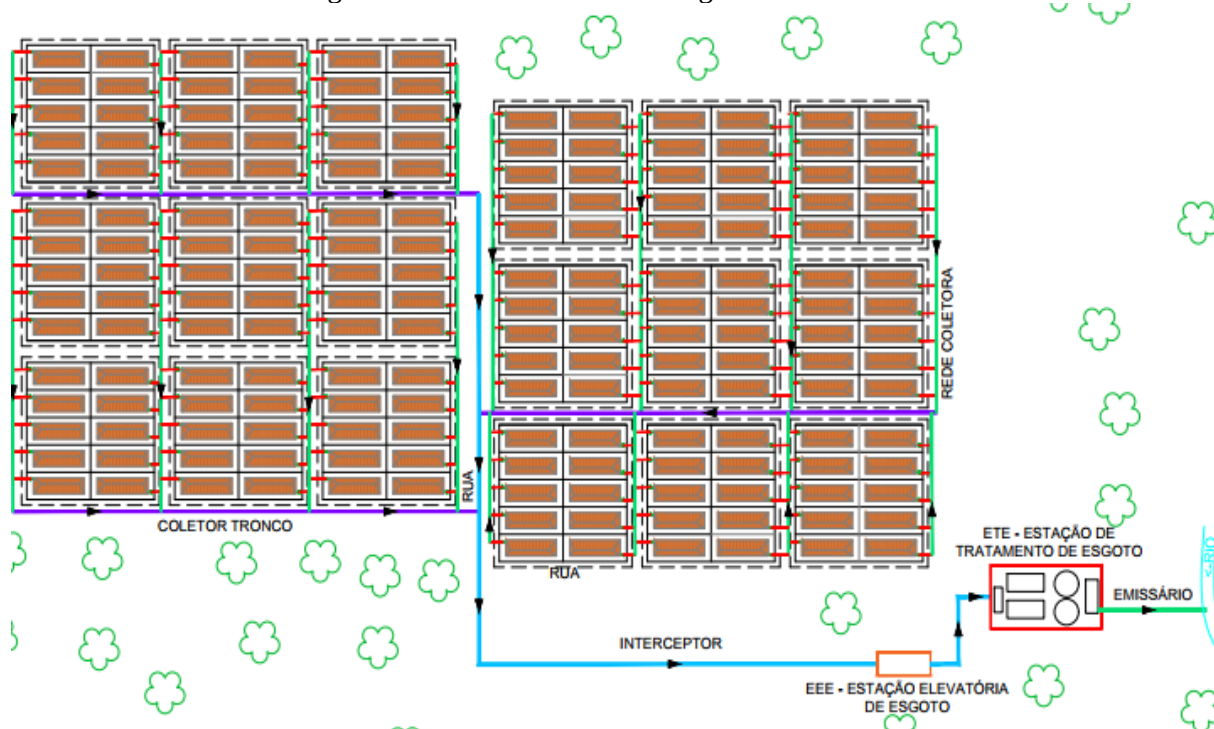
O sistema de esgoto é o conjunto de obras e instalações destinadas ao descarte das águas residuais de forma adequada do ponto de vista sanitário.

A concepção do esgoto sanitário utilizado na cidade de São Paulo é o Sistema Separador Absoluto onde a coleta é realizada por redes independentes, que tem como vantagem o menor custo na implantação da rede coletora, condições melhores para o tratamento de esgoto e o afastamento das águas pluviais, possibilitando o lançamento em locais mais próximos (PHILIPPI e MALHEIROS, 2005 *apud* MENEZES, NOVAES, MORAES, 2017).

Tal sistema é composto por ligações domiciliares onde há a coleta das águas residuais das casas, edifícios e indústrias, indo diretamente para a rede coletora. Após a passagem pela rede, o coletor tronco recebe os efluentes encaminhando para o interceptor, que se trata de tubulações maiores que geralmente acompanham um curso de um rio amortecendo a vazão do coletor tronco, exemplificado na Figura 7.

Dependendo da topografia, ou do ponto de vista técnico e/ou econômico da região, quando o escoamento do esgoto não é realizado por ação da gravidade, se faz necessário o bombeamento das águas residuais utilizando uma estação elevatória de esgoto (EEE). Posteriormente, chegando à estação de tratamento de esgoto (ETE)

Figura 7 – Fluxo do sistema de esgotamento sanitário



Fonte: Menezes, Novaes, Moraes, Toma e Rodrigues (2017)

3.2. SISTEMA DE INTERCEPTAÇÃO PINHEIROS

O rio Pinheiros é servido por dois interceptores de esgotos denominados por IPI⁸-6 (diâmetro de 2000 mm e extensão de 19 km) e IPI-7 (diâmetro de 2000 mm e extensão de 9,5 km). Um terceiro interceptor (IPI-8) (diâmetro de 1500 mm e extensão de 2248 m) está sendo implantado.

O interceptor da margem direita, denominado IPI-6, transporta os esgotos desde as elevatórias da margem direita da Billings (EEE Billings) prosseguindo até a Estação Elevatória Pomar (EEE Pomar) localizada próxima a estação Vila Olímpia da CPTM.

Neste trecho, o interceptor denominado IPI-6 Montante recebe ainda as contribuições do interceptor IPI-7 que se desenvolve na margem esquerda desde a elevatória EEE Grajaú interligando-se ao IPI-6 através de uma travessia (diâmetro de 2500 mm, extensão de 230 m e 16 m de profundidade) sob o rio Pinheiros localizada em frente ao Unimed Hall. São também lançadas nesta interligação algumas

⁸IPI: nomenclatura utilizada para o sistema de interceptor na região de Pinheiros.

contribuições de jusante do IPI-7. O IPI-6 passa a se denominar a partir desta travessia IPI-6 Jusante.

Os esgotos depois de alteados na EEE Pomar prosseguem fluindo no IPI-6 Jusante em direção à Estação Elevatória Pinheiros (EEE Pinheiros). De lá os esgotos são bombeados por um emissário EM-1 de recalque (existente) que se encaminha, atravessando sob o rio Pinheiros, até a margem esquerda, prosseguindo até a ETE Barueri.

3.3. A ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ESGOTO PINHEIROS

A Estação Elevatória de Esgoto Pinheiros (EEE Pinheiros) entrou em operação em dezembro de 1999, compondo o sistema de interceptação da bacia da Estação de tratamento de Esgoto Barueri (ETE Barueri), sendo responsável pela condução do esgoto gerado na região sul da cidade de São Paulo para ETE Barueri.

Trata-se de dois poços circulares concêntricos com diâmetros distintos, 25,60m e 13,70m, executados em concreto armado moldado *in loco* com cobertura metálica, melhor observado na figura 8 logo a frente e mais detalhada nos anexos deste trabalho.

Figura 8 – Vista externa da EEE Pinheiros



Fonte: Acervo da Concessionaria

A estrutura possui aproximadamente 32 metros de altura, sendo 12,50 metros acima do nível do solo e 19,50 metros abaixo dele. Na parte inferior, ocupando todo o diâmetro de 25,60 metros, localiza-se o Poço de Sucção na qual ocorre a chegada do esgoto. Tal pavimento contém 9,50 metros de altura em estrutura fechada e 17,50 metros aberta na área compreendida entre o poço externo e o interno. Logo acima, no poço externo, está localizado o poço seco, onde estão os conjuntos de 06 (seis) moto-bombas. O poço interno é o poço úmido, com 18,70 m de altura, onde é destinado o esgoto para o processo de tratamento. A estrutura está assentada na cota 703,00 até a 734,89, topo dos pilares, onde a cobertura está apoiada.

3.1. HISTÓRICO

Em 2014, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) contratou uma empresa especializada para avaliar as condições das estruturas da Estação Elevatória de Esgoto Pinheiros. Para tanto, foram desenvolvidas atividades em campo como inspeção visual, cadastramento de anomalias e registro fotográfico das regiões internas e externas das estruturas. Através das informações coletadas em campo foi emitido um relatório Técnico de Inspeção das Estruturas de Concreto, que informa o estado das estruturas naquela época e sugere metodologias de recuperação para as anomalias observadas.

Em entrevista com colaboradores responsáveis pela operação do sistema descobriu-se que o produto NONOX, que é peróxido de hidrogênio, vinha sendo aplicado diariamente para diminuição do odor. Nas redes de coleta e estações de tratamento de esgotos o peróxido de hidrogênio é aplicado para evitar, na origem, a formação de odores ofensivos de gás sulfídrico (H₂S).

3.1.1. ANÁLISE VISUAL DA ESTRUTURA

Foi executada inspeção nas estruturas da Estação Elevatória de esgoto visando obter informações precisas e reais de suas atuais condições, bem como correlacionar as anomalias às causas. A inspeção foi realizada na área externa, no poço

seco e no poço úmido, sendo que não foi vistoriado o Poço de Sucção em função de restrições de acesso. Lembrando que a EEE estava em carga e operação no momento da inspeção.

A área externa da estrutura estava em bom estado. Observaram-se, de modo geral, fissuras com trajetória aleatória e de pequena abertura, decorrentes da retração hidráulica do concreto e que não prejudicam a durabilidade da estrutura.

3.1.2. RELATÓRIO 2014

Devido às condições do local, o acesso ao interior do poço úmido foi realizado empregando-se técnicas de alpinismo industrial. Na época, foram realizados ensaios de análise química da água; determinação de cloretos e sulfatos no poço úmido e no poço seco; localização das armaduras e determinação da espessura de cobrimento (pacometria); determinação da espessura carbonatada do concreto e determinação do potencial elétrico de corrosão das armaduras. A coleta de amostras de água para análise química e de concreto para determinação dos teores de cloretos e sulfatos foram realizados no poço úmido e os demais ensaios no poço seco na face externa do poço úmido.

A análise química da água foi realizada conforme Norma CETESB L1.007/88 – Determinação do grau de agressividade de meio aquoso ao concreto (Revogada em 22/12/2016) e classificada como “Risco ao concreto quanto ao aspecto da lixiviação acompanhada de carbonatação ou troca iônica”, com pH de 7,24, concentração de cloretos de 110,45 mg/l e sulfatos de 28,81 mg/l.

A localização das armaduras e determinação da espessura de cobrimento por indução magnética concluiu que o cobrimento das armaduras atingia o cobrimento mínimo normativo em 88% das áreas analisadas e o cobrimento nominal em 63% dos pontos de ensaio, apresentando-se majoritariamente adequado à classe de agressividade do ambiente.

A determinação da espessura carbonatada do concreto com solução de fenolftaleína indicou que a frente de carbonatação não havia alcançado a profundidade das armaduras nos pontos analisados. Elas encontravam-se passivadas e protegidas da

corrosão por carbonatação e que as estruturas estavam adequadas quanto à durabilidade superando 50 anos de vida útil restante caso fossem mantidas as condições ambientais e de uso na época.

O ensaio de determinação do potencial elétrico de corrosão das armaduras verificou que a probabilidade de corrosão era menor que 10% em todos os pontos ensaiados.

O ensaio para determinação dos teores de cloretos e sulfatos foi realizado em testemunhos de concreto extraídos do poço úmido em 3 exemplares e apontou um teor excessivo de cloretos em uma das amostras extraída de um nível mais alto.

Na inspeção visual, o relatório apresenta para o poço úmido desagregação do concreto em função de ataque químico e, em regiões isoladas, a armadura está exposta e corroída, uma visão geral da situação do poço é vista na Figura 9.

Figura 9 – Situação do poço úmido em 2014



Fonte: Acervo concessionária

Em suas considerações finais e recomendações foi apontado que: “Toda a superfície do poço apresenta desagregação do concreto e em pontos isolados a armadura está exposta e corroída. Esta anomalia deve-se ao ataque químico provocado pelo ácido sulfídrico, gerado em função do enxofre presente no esgoto.”

E continua: “Observou-se durante a inspeção que a camada superficial do concreto está se fragmentando quando submetida a impactos.”

Com base na análise dos resultados de ensaios foi apontada a necessidade de intervenção entre médio e curto prazo e recomendado a recomposição e aplicação de proteção superficial em toda a superfície do poço úmido, tratamento localizado das anomalias e proteção superficial a base de pintura no poço seco, incluindo-se procedimentos para recuperação das estruturas.

No procedimento para execução dos reparos do poço úmido, resumidamente, foi recomendado o hidrojateamento para limpeza e remoção do concreto friável, tratamento pontual onde houver fissuras, deslocamento ou algum tipo de patologia no concreto, recomposição da armadura onde necessário, recomposição com concreto projetado e finalização com aplicação de sistema de proteção das superfícies com revestimento mineral de alta resistência química.

Baseado neste relatório, a Sabesp contratou uma empresa para realizar os serviços como recomendado, porém esse contrato só foi possível em 2019, ou seja, 4 anos após a emissão dessas recomendações.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em maio de 2019 foi dado início aos serviços de recuperação das estruturas de concreto da Estação Elevatória Pinheiros. Como a estrutura do poço úmido só possui acesso em sua parte superior, foi montado andaime apoiado na laje da cobertura, descendo até o nível onde pretendia-se recuperar as paredes. Vale informar que a elevatória não seria desativada, ou seja, os serviços seriam realizados com ela em carga apenas reduzida. Imediatamente após a conclusão da montagem do andaime a equipe de qualidade da Sabesp inspecionou a estrutura e verificou que o problema era muito mais grave que em 2014, sendo inviável os serviços contratados.

Nessa inspeção visual realizada em junho de 2019 constatou-se que o concreto encontrava-se totalmente deteriorado, sendo possível o arrancamento superficial com a mão e a armadura passiva, que deveria estar com 5 centímetros de cobrimento, conforme projeto, já não existia mais - como pode ser observada nas figuras 10 e 11 abaixo, tal como a armadura já corroída de forma generalizada.

Figura 10 – Arrancamento do concreto com a mão em um dos pilares da estrutura



Fonte: Acervo da Concessionária

Figura 11 – Parede do vertedouro com concreto deteriorado e armadura corroída



Fonte: Acervo da Concessionária

A laje de cobertura, onde estava ancorado o andaime, estava totalmente comprometida e o andaime teve que ser removido às pressas com guindaste, devido ao perigo de desmoronamento desta estrutura. Deu-se início, então, a uma investigação do que poderia ter acontecido para que a estrutura se deteriorasse tão intensamente em apenas 4 anos após a emissão do relatório inicial. Após a inspeção visual e análise de documentos, foram iniciados ensaios não destrutivos e destrutivos, os quais objetivaram o levantamento da atual situação.

4.1. HIPÓTESE

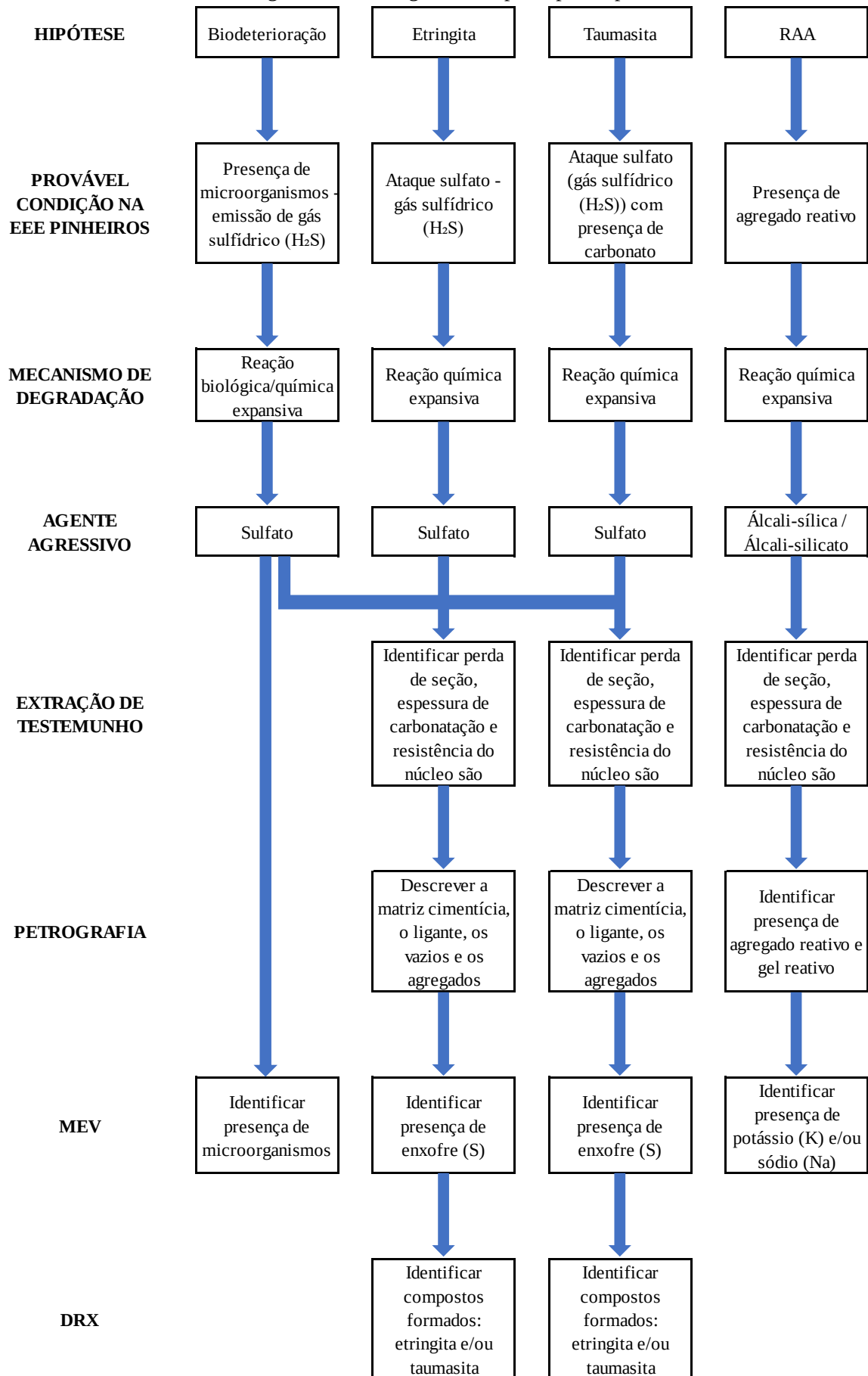
Presume-se que as origem-causa da deterioração do concreto da Estação Elevatória de Esgoto Pinheiros devam ser de origem química ou microbiológicas, uma vez que o laudo de vistoria da estrutura de quatro anos atrás revela apenas fissuras que não implicam no colapso do sistema e traz tratamento cotidiano para elas. Ou seja, o agente agressivo que deteriorou o concreto de forma expressiva agiu em tempo inferior a quatro anos. Este fator de tempo unido ao fator de degradação presente na estrutura mostra o quão agressivo é o agente causador deste mal.

Visto isso, acredita-se que um agente mecânico não poderia causar tal manifestação patológica. Por outro lado, um agente de origem química, microbiológica ou até mesmo o conjunto destas duas origens poderia acelerar o processo de deterioração causada pelos gases emitidos pelo esgoto, dado que a área mais afetada é a superior da estrutura onde o nível da água não alcança.

4.2. FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTO

Para que as principais hipóteses de ter levado a estrutura a tamanho grau de deterioração fossem checadas, fez-se um fluxograma elencando-as com seus mecanismos de deterioração, agente agressivo, ensaios e quais fatores a serem observados nos resultados, tal como a condição que poderia ter desencadeado tal fenômeno. O que pode ser observado após a conclusão do fluxograma apresentado na Figura 12 foi que uma biodeterioração levaria a duas outras formas de ataque, ambas relacionadas ao sulfato, entretanto uma com formação de etringita e outra mais grave com formação de taumasita, além de uma remota possibilidade de RAA.

Figura 12 – Fluxograma das principais hipóteses



4.3. ENSAIOS

Inicialmente foi realizada prospecção da armadura através de pacometria e abertas janelas de inspeção. Na sequência, foram extraídos corpos de prova para ensaios de resistência à compressão e verificação da espessura das paredes, realizado ensaio de carbonatação com fenolftaleína, análise petrográfica e ensaio por microscópio eletrônico de varredura.

Os ensaios de resistência à compressão foram executados por dois laboratórios distintos, aqui denominados laboratório A e laboratório B.

Durante os ensaios foi observada uma perda considerável na seção da laje onde os andaimes estavam apoiados, portanto foi solicitada a retirada imediata do andaime para aliviar a carga nesta estrutura avaliada pelo calculista como colapsada, o que impossibilitou a realização de outros ensaios, que poderiam auxiliar no diagnóstico. As amostras foram colhidas de fora para dentro, utilizando uma plataforma móvel.

Pelo laboratório A foram extraídos 3 testemunhos de concreto da laje em balanço existente na borda superior e 12 testemunhos na parede do poço úmido.

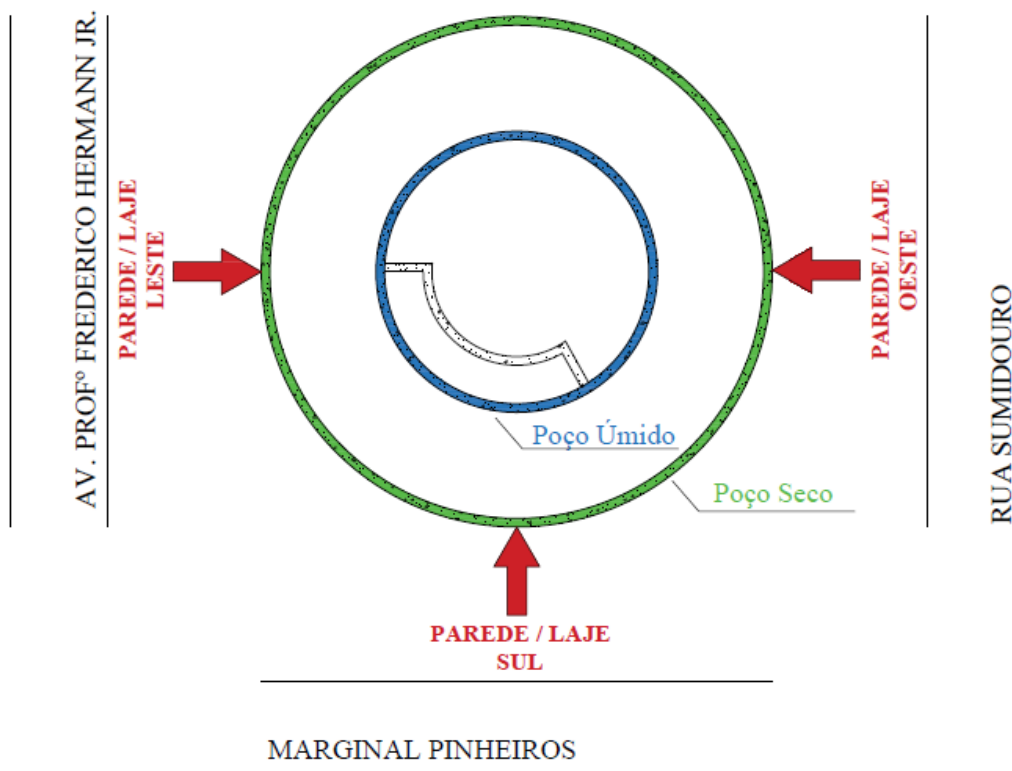
Nos testemunhos extraídos foram feitos ensaios para determinação da profundidade de carbonatação com fenolftaleína, ensaios de resistência à compressão, realizadas medidas reais da espessura da parede e análise por microscópio eletrônico de varredura.

Pelo laboratório B foram extraídos 4 testemunhos na parede do poço úmido para ensaios de resistência à compressão e análise petrográfica.

4.3.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO E CARBONATAÇÃO

Para análise destes ensaios, é importante o conhecimento básico da estrutura e procurando facilitar o entendimento do leitor, a seguir encontra-se a figura 13 representando a EEE Pinheiros com os termos adotados.

Figura 13 – Croqui Esquemático de Paredes / Lajes e sua Localização



Fonte: Elaborado pelos autores

Os resultados das amostras recolhidas pelo laboratório A identificaram uma perda de seção do concreto de 8% nas paredes no nível mais próximo da lâmina d'água, 17% no nível intermediário e chegou a 26% em um dos testemunhos extraídos no nível mais alto da estrutura. A profundidade de carbonatação chegou ao máximo de 60mm distante da cordoalha e nos ensaios de resistência à compressão no núcleo são 66% dos resultados mantiveram-se acima da resistência de projeto, 25 MPa.

Na laje em balanço, estrutura na qual estava ancorado o andaime, foi constatada uma perda de seção de concreto muito grande, cerca de mais de 45% em média, e a armadura ativa não mais existia. Os resultados do ensaio de resistência à compressão no núcleo não estavam próximos da resistência de projeto, 25MPa. Na Tabela 02 os resultados são apresentados de forma resumida conforme o relatório do laboratório.

Tabela 2- Ensaio de resistência a compressão laboratório A

CP	Local	Elevação	Perda de seção (mm)	Profundidade Carbonatação (mm)	Fci ext (MPa)
1	Parede Sul	727,17	30	16,8	23,9
				13,5	22,7
2	Parede Sul	728,67	50	14,2	24,9
				13,1	22,2
3	Parede Sul	730,17	40	14,6	28,0
				13,6	26,1
4	Parede Oeste	725,93	30	17,2	34,5
				15,3	23,1
5	Parede Oeste	726,93	70	15,9	30,6
				18,0	34,6
6	Parede Oeste	730,83	90	15,4	29,6
				18,5	35,5
7	Laje Cobertura Sul	733,42	95	13,5	25,2
8	Laje Cobertura Oeste	733,42	45	12,8	24,5
9	Laje Cobertura Leste	733,42	84	11,6	22,5
MÉDIA					27,2

Fonte: Relatório laboratório A

Já os resultados obtidos pelo laboratório B mostram uma resistência a compressão média de 58,8 MPa. Tal resultado pode ser bastante questionado, se tratando de uma estrutura de 20 anos de idade com resistência de projeto em 25 MPa. Na tabela 03 pode-se observar um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 3- Ensaio de resistência a compressão laboratório B

CP	Local	Ruptura	Fci ext (MPa)	Massa específica (kg/m³)
1	Parede nível inferior	Colunar com formação de cones	59,70	2292
2	Parede nível intermediária	Cônica e cisalhada	58,30	2302
3	Parede nível superior	Cônica e cônica afastada de 25mm do capeamento	57,70	2328
4	Parede nível patamar escada (cota 720)	Cônica e cisalhada	59,50	2315
MÉDIA			58,80	

Fonte: Relatório laboratório B

4.3.2. PETROGRAFIA

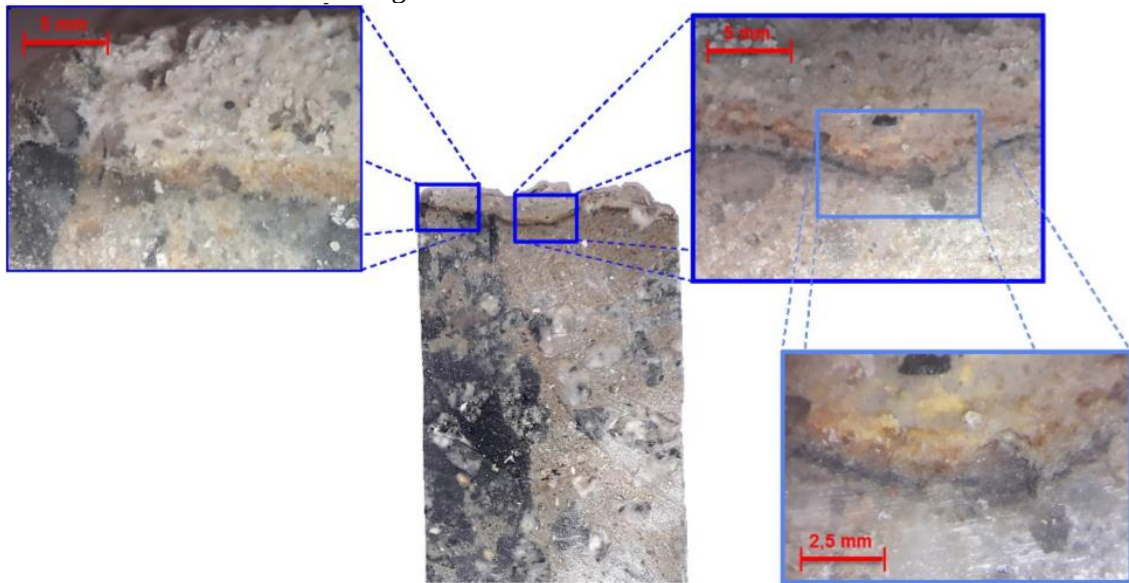
Os testemunhos 1 e 3 foram selecionados para a realização do ensaio petrográfico por representar de melhor forma a interface entre as áreas atacadas e as áreas sãs. O detalhe desta interface sob lupa binocular estereoscópica pode ser observado nas Figuras 14 e 15, onde são apresentadas as áreas ensaiadas dos testemunhos 1 e 3 respectivamente.

Segundo os ensaios, a descrição macroscópica dos agregados graúdos do testemunho 1 possui arranjo e estrutura de grãos predominantemente equidimensional, anguloso, distribuição heterogênea sem padrão definido, sem segregação e sem orientação preferencial classificado como brita. O testemunho 3 difere por ter distribuição homogênea e quando alongado, possui orientação subparalela à superfície externa, entretanto também classificado como brita.

Os agregados miúdos do testemunho 1 possui arranjo e estrutura dos grãos predominantemente equidimensional, subanguloso, distribuição homogênea, sem segregação e sem orientação preferencial, classificado como areia de britagem. Já o testemunho 3 apenas se difere por ser classificado como areia britada.

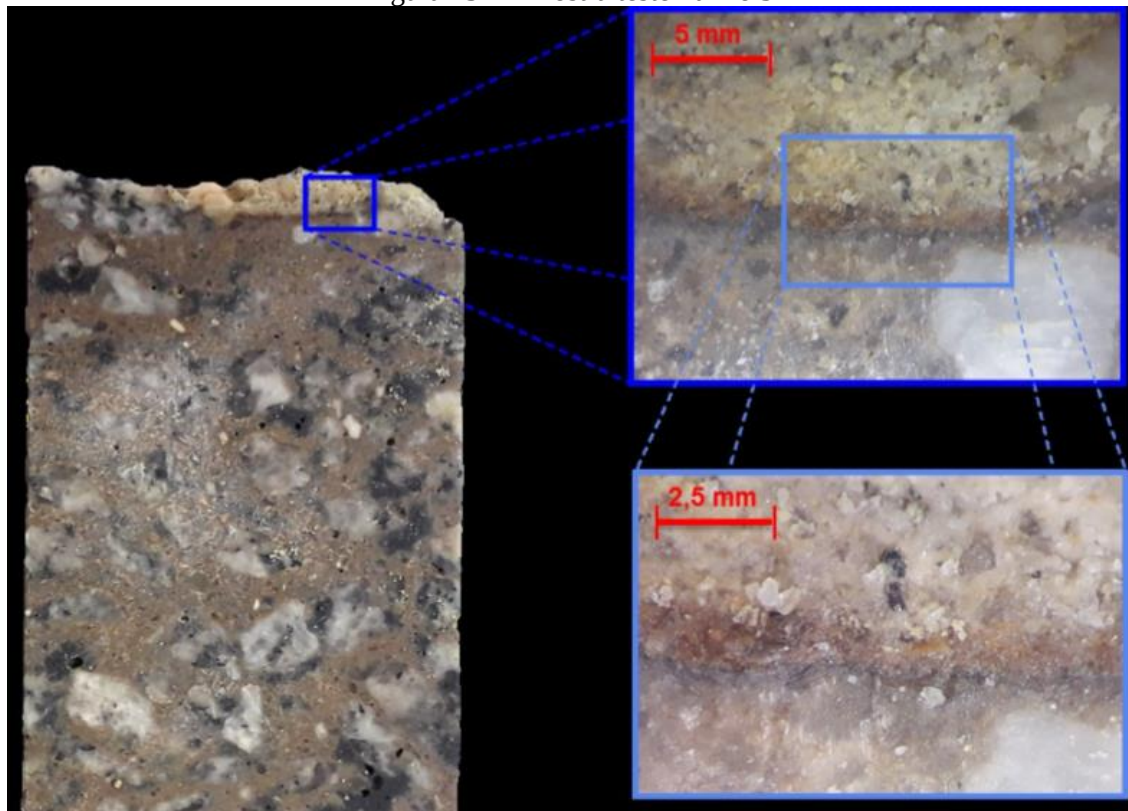
A matriz do testemunho 1 foi classificada com cor cinza rosada e cinza médio, mesclada de acordo com *Rock-Color Chart* (1963), com distribuição homogênea, sem fissuras detectadas, seus vazios são predominantemente esféricos, por vezes coalescentes, em distribuição heterogênea sem padrão definido, localmente preenchidos por material pulverulento de cor branca, sem itens alojados detectados. O testemunho 3 apenas difere na classificação de cor, onde recebeu cinza oliva claro, homogênea como classificação.

Figura 14 – Amostra testemunho 1



Fonte: Relatório laboratório B

Figura 15 – Amostra testemunho 3



Fonte: Relatório laboratório B

Foi realizada uma descrição quanto ao litotipo do agregado graúdo dos testemunhos, sendo classificado como granadamucovita gnaiss, com composição mineralógica variada por feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo, muscovita, granada,

opacos, com descrição de rocha de estrutura maciça, localmente orientada, apresentando textura predominantemente xenomórfica, localmente mortar, mirmequita, quartzo com extinção ondulante migração de borda, feldspato alcalino micropertítico, localmente poiquilítico, plagioclásio zonado, muscovita xenomórfica, geralmente orientada, por vezes formando lentes. O laboratorista alerta sobre a presença de mortar e mirmequítica, que são potencialmente reativos e passíveis de desenvolvimento de RAA.

Quanto ao agregado miúdo a composição mineralógica é dada por quartzo (predominantemente monocristalino, ou policristalino), feldspato alcalino, plagioclásio, muscovita, biotita verde/marrom, opacos para testemunho 1 e hornblenda, opacos para testemunho 2, ambos com presença de raros torrões de argila e para testemunho 3 contém ainda presença de fragmentos de agregado graúdo.

Numa descrição microscópica dos agregados é determinado que o arranjo e aderência são dados por empacotamento flutuante a localmente pontual, em distribuição homogênea, com granulometria seriada (multimodal) e aderência com a pasta localmente prejudicada pela presença de microfissuras na interface pasta-agregado, associadas ou não a microporosidade na pasta.

Os vazios foram classificados para o testemunho 1 sendo bolhas de ar (diâmetro: 50 μm a 1,9 mm) esféricas, raramente coalescentes, parcialmente preenchidas por material da pasta ou sem preenchimento, presença comum de microfissuras na pasta (espessura: até 30 μm), descontínuas e por vezes associadas a outros vazios, e microfissuras na interface pasta-agregado (espessura: até 100 μm), descontínuas, de extensão variável, sem preenchimento ou parcialmente preenchidas por portlandita, microporosidade localizada a pontual na interface pasta-agregado ou ao redor de microfissuras. Parte dos grãos de agregado apresentam microfissuramento interno. Para o testemunho 3, bolhas de ar (diâmetro: 90 μm a 750 μm) esféricas, raramente coalescentes, sem preenchimento ou parcialmente preenchidas por material da pasta, presença comum de microfissuras na pasta (espessura: até 30 μm), contínuas e por vezes interligando bolhas de ar ou microfissuras na interface pasta-agregado, microfissuras na interface pasta-agregado são muito comuns (espessura: até 50 μm), descontínuas, de extensão variável, parcialmente preenchidas por portlandita, microporosidade localizada a pontual na interface pasta-agregado ou ao redor de

microfissuras, notam-se vazios irregulares, provavelmente oriundos da evolução de microporosidade. Parte dos grãos de agregado apresentam microfissuramento interno.

Quanto a matriz dos testemunhos é dada a descrição vista na Tabela 04 apresentada a seguir:

Tabela 4 - Descrição microscópica da matriz dos testemunhos de concreto

Testemunho	Matriz	
	Cimento	Ligante
1	Presença de núcleos anidros de clínquer (pouco comum, 5 μ m a 70 μ m), predominantemente alita, por vezes evidenciando halo de reação. Ferrita (rara) ocorre pontualmente, como micropontuações heterogeneamente dispersas na pasta. C-S-H ocorre como micromassa compacta indistinta. Nota-se escória reativa e não-reativa em abundância. A escória parece apresentar duas diferentes composições, sendo uma incolor-amarelada e menos reativa e outra preto-esverdeada, mais reativa, que parece conferir coloração mais escura ao cimento de alguns locais da amostra. Possível presença de sílica ativa.	Pasta de cor marrom escuro. Nota-se abundância de portlandita (5 μ m a 90 μ m), na interface pasta-agregado, preenchendo vazios, ou dispersa na pasta, suborientada segundo duas direções preferenciais e ortogonais entre si.
3	Presença de núcleos anidros de clínquer (pouco comum, 5 μ m a 40 μ m), predominantemente alita, por vezes evidenciando halo de reação. Ferrita (rara) ocorre pontualmente, como micropontuações heterogeneamente dispersas na pasta. C-S-H ocorre como microaglomerados de textura indistinta. Nota-se escória reativa e não-reativa em abundância. A escória parece apresentar duas diferentes composições, sendo uma incolor-amarelada e menos reativa e outra pretoesverdeada, mais reativa, que parece conferir coloração mais escura ao cimento de alguns locais da amostra. Possível presença de sílica ativa.	Pasta de cor marrom escuro. Nota-se abundância de portlandita (5 μ m a 50 μ m), na interface pasta-agregado, preenchendo vazios, ou dispersa na pasta, suborientada segundo duas direções preferenciais e ortogonais entre si.

Fonte: Relatório laboratório B

Como resultado, as evidências patológicas são apresentadas na Figura 16 a seguir:

Figura 16 – Descrição de evidências patológicas identificadas nas amostras dos testemunhos de concreto

AMOSTRA	Evidências de Patologia
"Testemunho 1 (nível inferior)" (LMCC nº 482/19)	Região atacada (espessura total, na lâmina: 1,6 mm a 4,1 mm) correspondendo a três zonas distintas. A primeira (espessura: 600 µm a 2,0 mm), mais externa, apresenta substituição da pasta por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa, em textura semelhante a "mortar", pontualmente carbonatada. A segunda (espessura: 1,0 mm a 2,0 mm), intermediária, apresenta substituição parcial da pasta, com impregnação de hidróxidos de ferro e possível matéria orgânica. A terceira (espessura: 0 a 130 µm) trata-se de uma zona de carbonatação, descontínua, na interface com o concreto aparentemente não atacado. As três zonas apresentam abundante microfissuramento, sem preenchimento ou parcialmente preenchido por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa. Nota-se presença de microfissura descontínua, de espessura 0 a 130 µm, ao longo da interface entre a terceira ou segunda camada e o concreto aparentemente não atacado. A quantidade e configuração de vazios (descritos na Tabela 10) mantém-se em profundidade, indicando tratar-se de características originais do concreto e não pertencente à zona atacada.
"Testemunho 3 (nível superior)" (LMCC nº 484/19)	Região atacada (espessura total, na lâmina: 500 µm a 3,7 mm) correspondendo a três zonas distintas. A primeira (espessura: 400 µm a 1,9 mm), mais externa, apresenta substituição da pasta por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa, em textura semelhante a "mortar". A segunda (espessura: 100 µm a 1,7 mm), intermediária, apresenta substituição parcial da pasta, com intensa impregnação de hidróxidos de ferro e possível matéria orgânica. A terceira (espessura: 0 a 100 µm) trata-se de uma zona de carbonatação, descontínua, na interface com o concreto aparentemente não atacado. As três zonas apresentam abundante microfissuramento, sem preenchimento ou parcialmente preenchido por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa. Nota-se presença de microfissura descontínua, de espessura 20 µm a 650 µm, ao redor de agregado que encontra-se na interface entre a terceira camada e o concreto aparentemente não atacado. A quantidade e configuração de vazios (descritos na Tabela 10) mantém-se em profundidade, indicando tratar-se de características originais do concreto e não pertencente à zona atacada.

Fonte: Relatório laboratório B

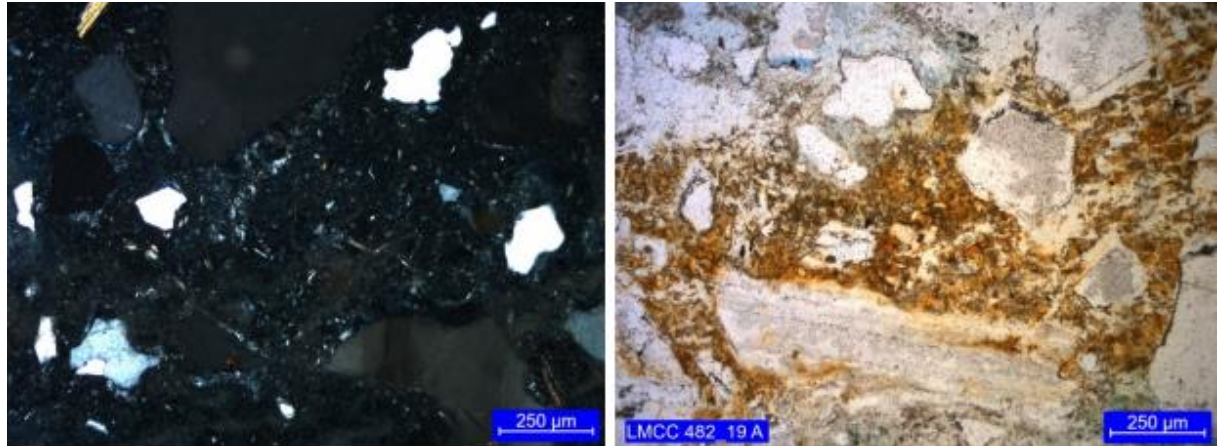
O laboratório observa que as espessuras nas regiões atacadas podem não tratar a realidade uma vez que pode existir perda de material friável no transporte.

Também há disponível no laudo do ensaio algumas fotomicrografias das zonas de transição com informações importantes apresentadas a seguir.

Na Figura 17 têm-se a primeira e segunda camada de alteração do testemunho 1 respectivamente, sendo 17a uma fotomicrografia por polarização cruzada, com condensador parcial, apresentando a substituição da pasta por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa, sugerido como possível gipsita pelo laboratório e 17b uma fotomicrografia por polarização simples, com condensador, apresentando,

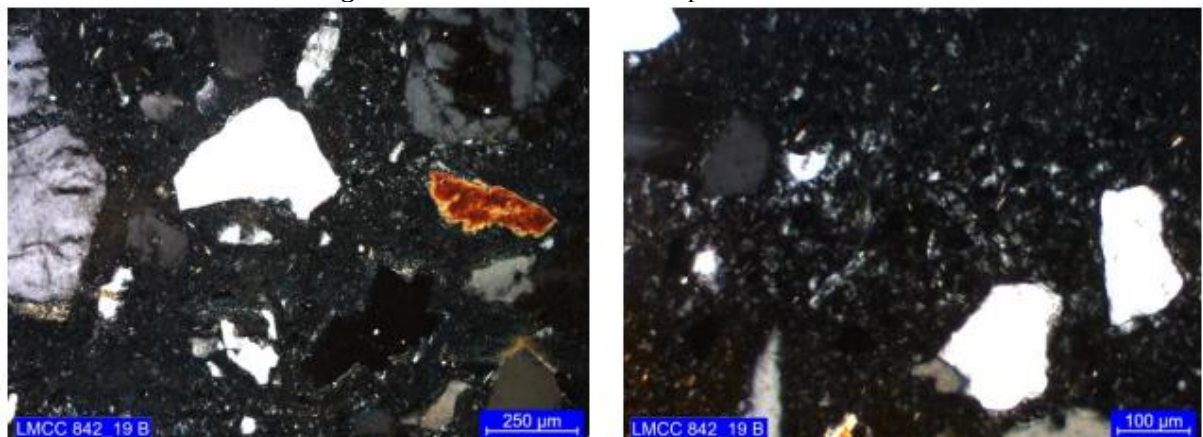
em tons avermelhados, a impregnação de hidróxidos de ferro. Na Figura 18 a e b têm-se outras duas regiões do testemunho 1 com mesma descrição da figura 17a.

Figura 17 – Testemunho 1 – Primeira camada de alteração



Fonte: Relatório Laboratório B

Figura 18 – Testemunho 1 – Topo do testemunho

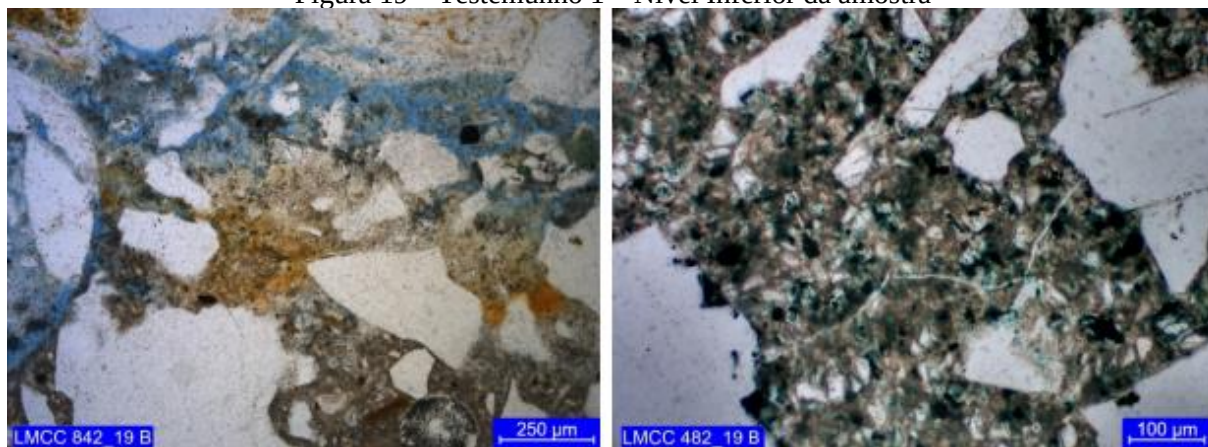


Fonte: Relatório Laboratório B

Na figura 19a têm-se uma fotomicrografia por polarização simples, com condensador de outro local de interface entre a região atacada (em cima) e região aparentemente não atacada (embaixo), apresentando, em tons azuis, presença de microfissuras e microporosidade no limiar entre as regiões. Na Figura 19b têm-se uma fotomicrografia por polarização simples, com condensador, apresentando a presença abundante de escória esverdeada na pasta aparentemente não atacada. Na Figura 20 têm-se fotomicrografia do aspecto geral do topo da amostra, apresentando a interface entre

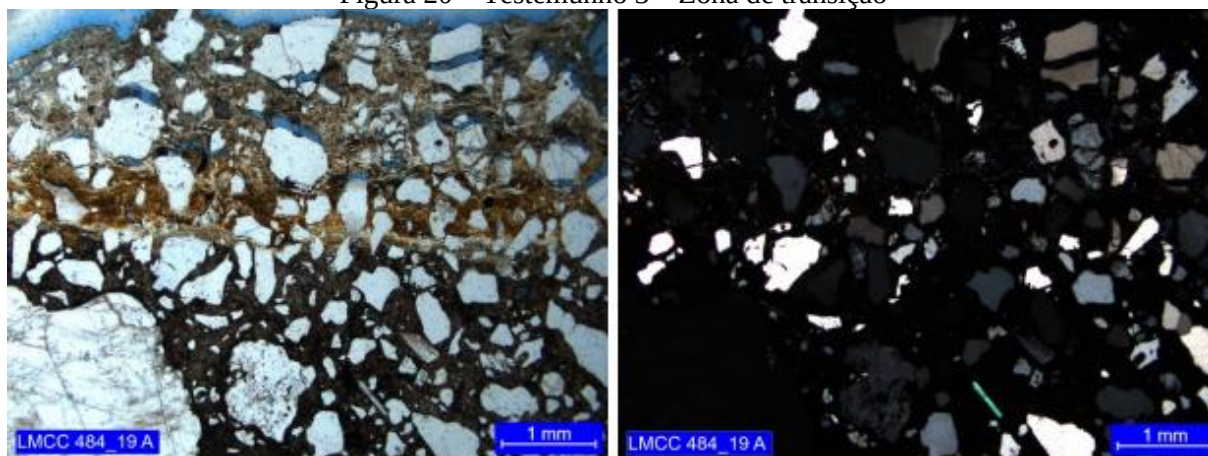
a região atacada (em cima) e região aparentemente não atacada (embaixo) por polarização simples e cruzada respectivamente.

Figura 19 – Testemunho 1 – Nível Inferior da amostra



Fonte: Relatório Laboratório B

Figura 20 – Testemunho 3 – Zona de transição

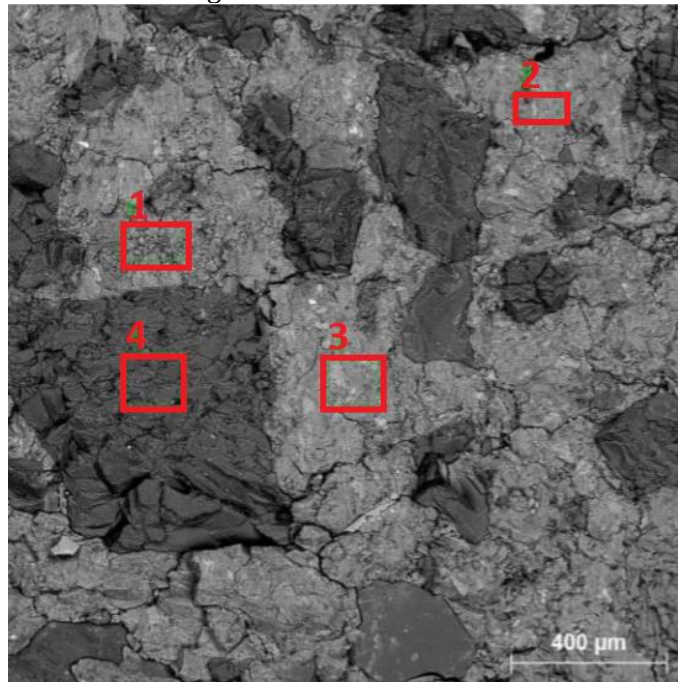


Fonte: Relatório Laboratório B

4.3.3. MICROSCOPIA DE VARREDURA (MEV)

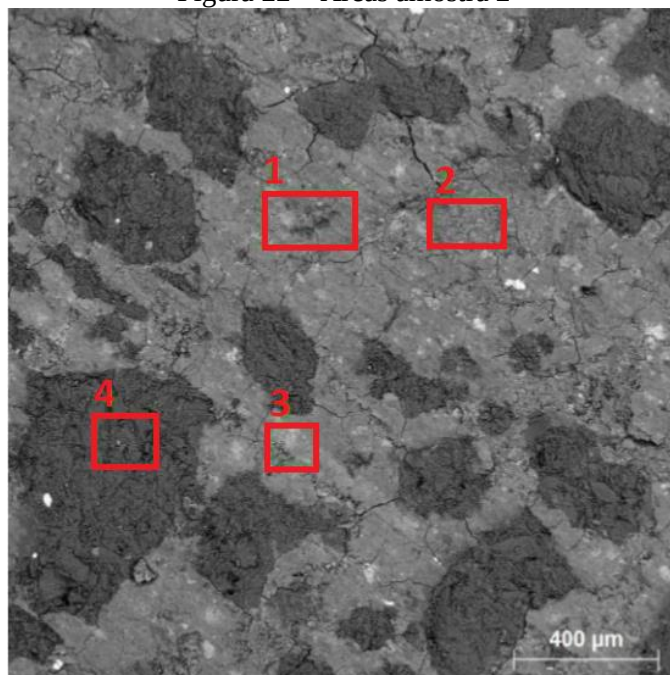
No ensaio de MEV foram analisadas áreas conforme esquema apresentado nas Figuras 21 e 22 para as duas amostras colhidas para o ensaio:

Figura 21 – Áreas amostra 1



Fonte: Relatório Laboratório A

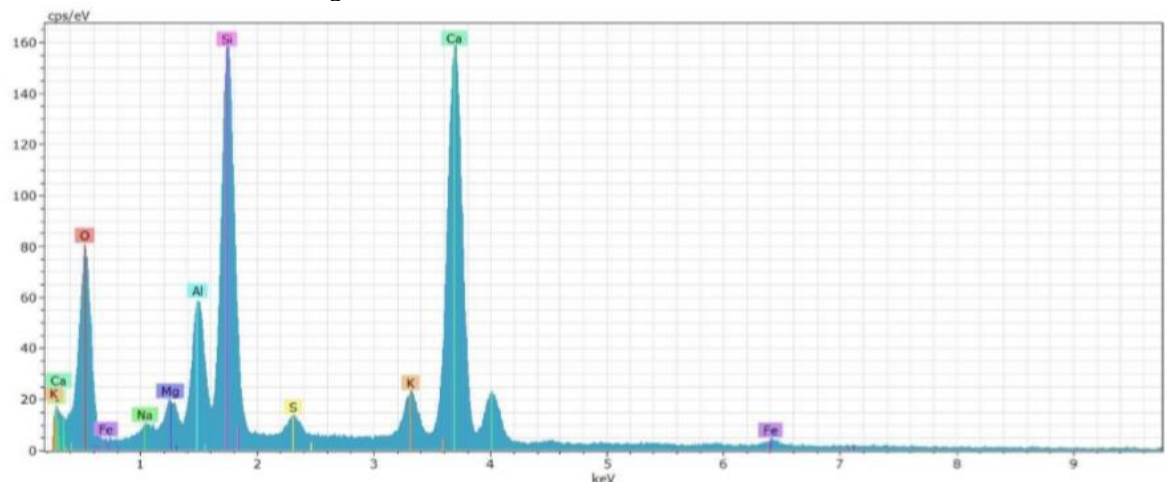
Figura 22 – Áreas amostra 2



Fonte: Relatório Laboratório A

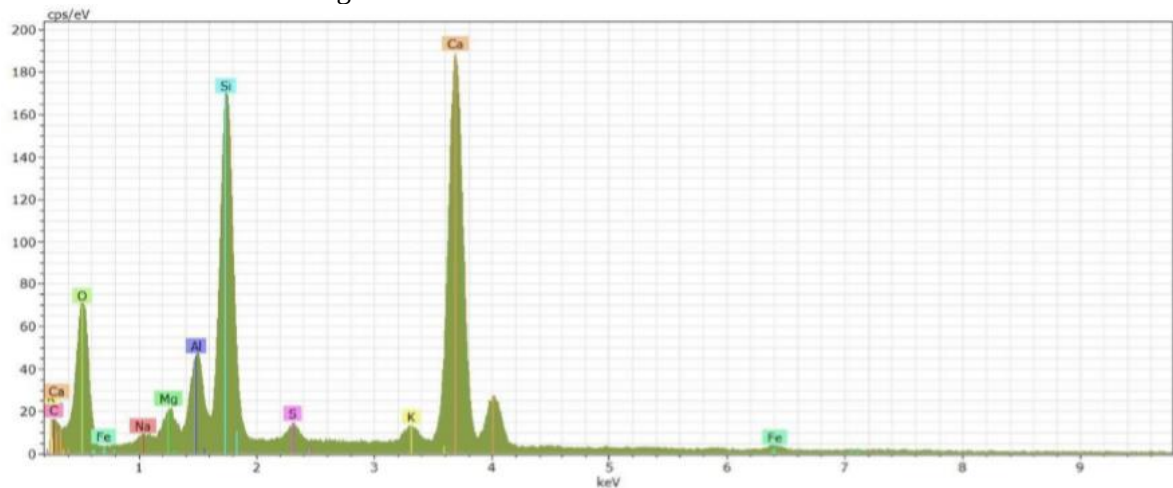
As áreas apresentadas acima foram submetidas a análises EDS e são apresentadas nas Figuras 23-30 a seguir:

Figura 23 – Análise EDS da área 1 da amostra 1



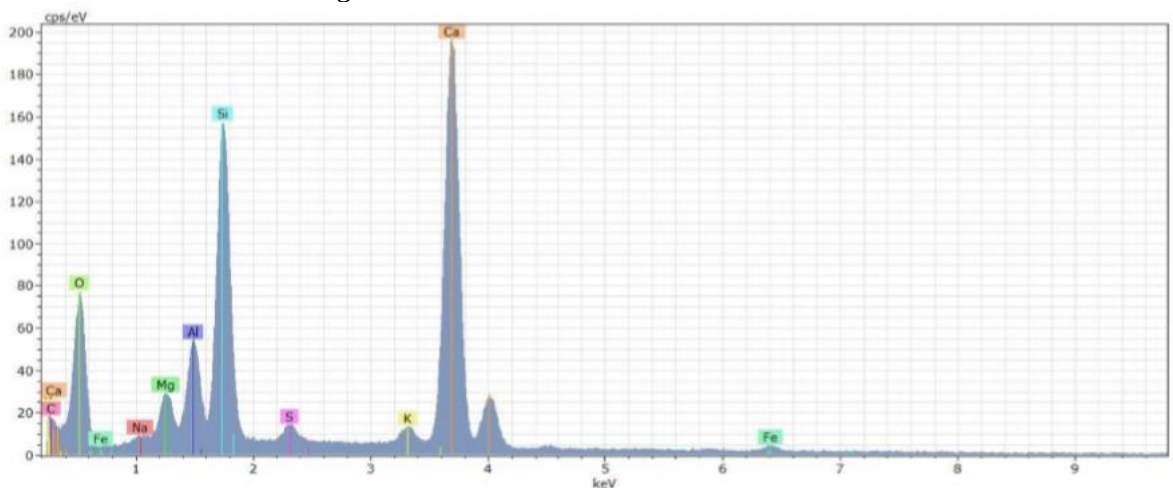
Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 24 – Análise EDS da área 2 da amostra 1



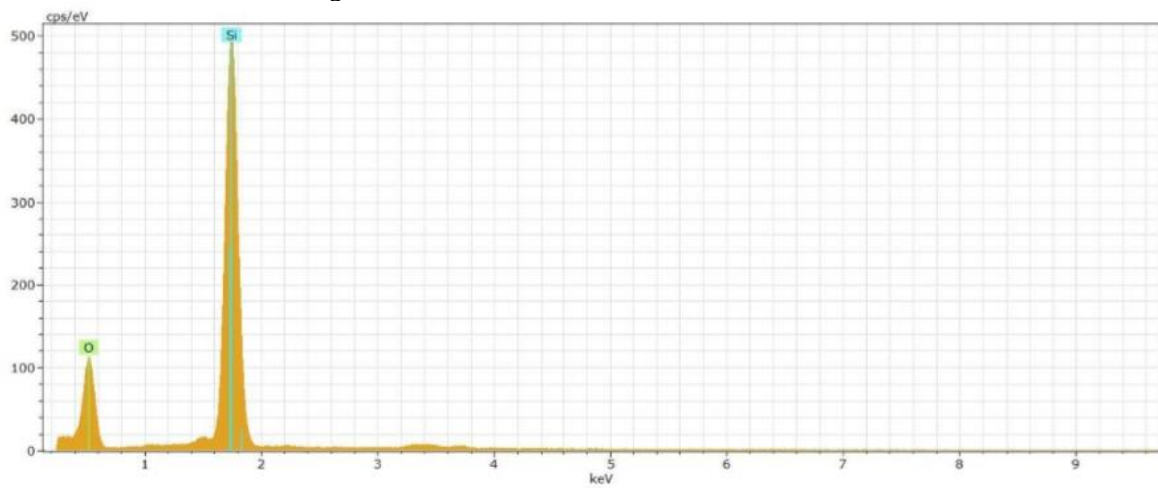
Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 25 – Análise EDS da área 3 da amostra 1



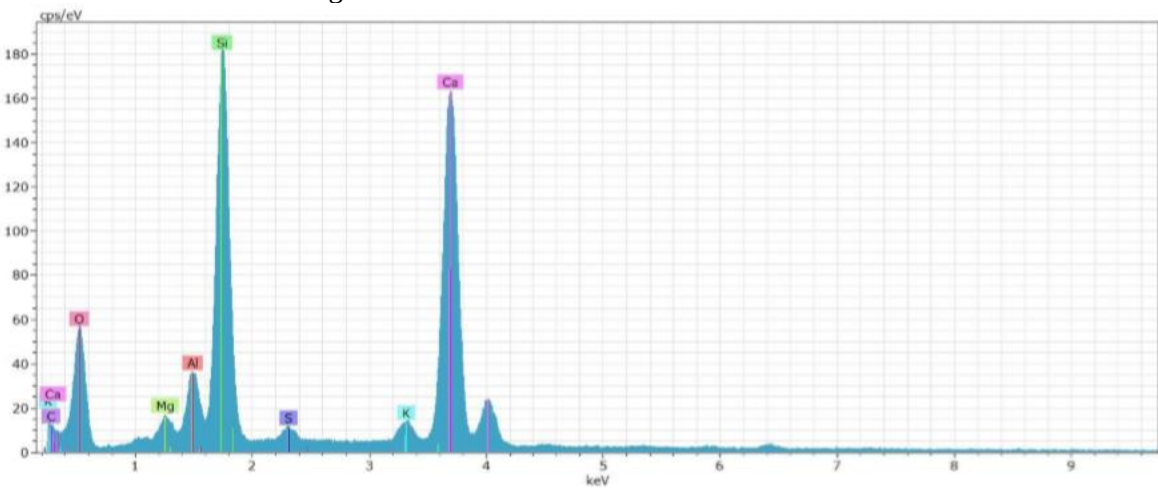
Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 26 – Análise EDS da área 4 da amostra 1



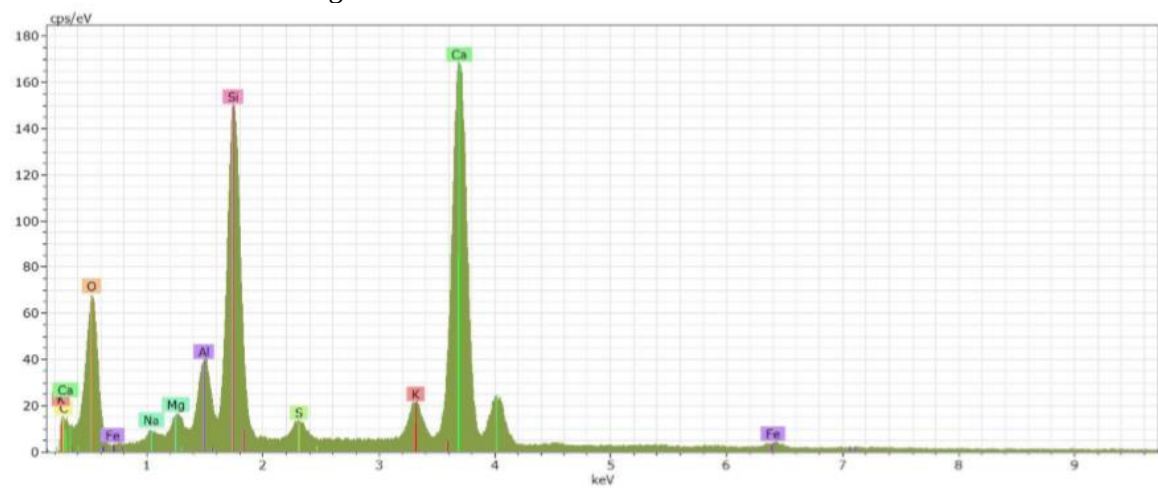
Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 27 – Análise EDS da área 1 da amostra 2



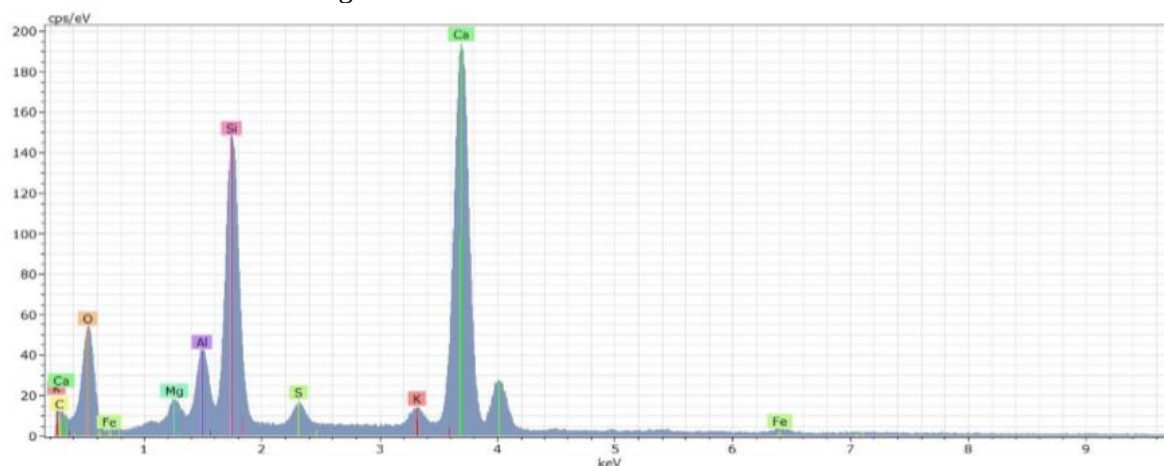
Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 28 – Análise EDS da área 2 da amostra 2



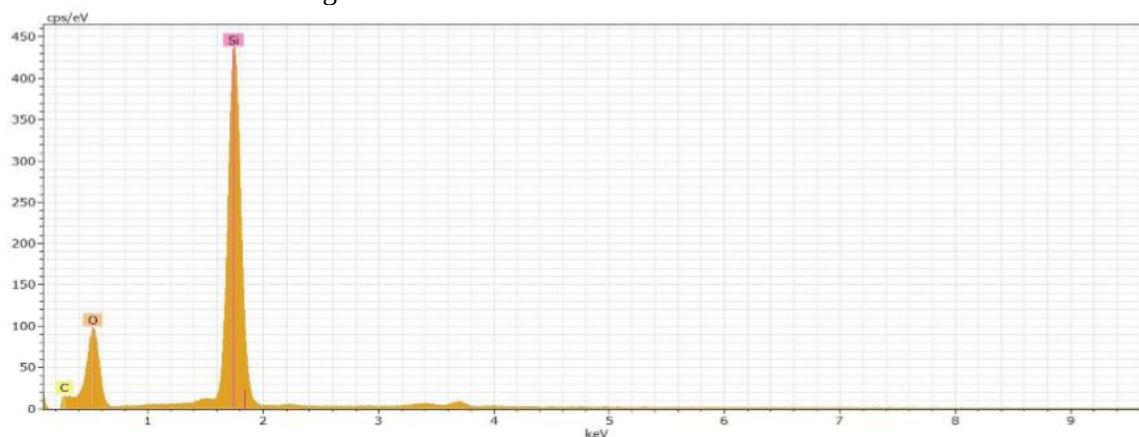
Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 29 – Análise EDS da área 3 da amostra 2



Fonte: Relatório Laboratório A

Figura 30 – Análise EDS da área 4 da amostra 2



Fonte: Relatório Laboratório A

Acredita-se que o ensaio de MEV tenha sido realizado no núcleo são do concreto e por essa razão podem não refletir o resultado apresentado no ensaio de petrografia nem tampouco explicar com maior detalhamento as causas da deterioração.

Como resultado do ensaio, são apresentadas micro fraturas na pasta ao redor do agregado fino e estes por sua vez são angulosos e pouco arredondados. As micro fraturas não se encontram preenchidas de gel de RAA, mas não descarta a possibilidade. As análises EDS mostram predominância de agregados siliciosos - mais especificamente quartzo e em menor proporção rochas contendo sílica, potássio e alumínio, mais precisamente granito. A pasta é predominantemente composta por cálcio, silício e enxofre.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Considera-se que foram atingidos os objetivos propostos no início da pesquisa e pode-se observar:

- i. Os ensaios de extração de testemunhos foram realizados nas paredes e lajes do poço úmido. Com base nos resultados obtidos pelos Laboratórios A e B, exibidos no Item 4.3.1 – Resistência a Compressão e Carbonatação, foi possível aferir que os resultados apresentados pelo Laboratório B são inconclusivos e questionáveis.

Ao observar a Tabela 3, chegou-se a valores de resistências a compressão média de 58,80 MPa, incompatíveis aos dados levantados em projeto que são de 25 MPa.

É sabido que o ganho de resistência do concreto devido a hidratação de seus compostos é constante. Porém, o ganho das amostras é discordante ao entendimento técnico. Portanto, o ensaio é válido para discussões técnicas futuras, mas, para o tema abordado neste trabalho o ensaio será desconsiderado.

Contudo, no ensaio elaborado pelo Laboratório A, mencionado na Tabela 02, obtemos fatores de grau de confiabilidade maiores para a sequência do trabalho, em relação a sua média a compressão de 27,20 MPa – valor aproximado com o estabelecido em projeto.

Sendo assim, é possível aferir que a resistência ao concreto estipulada em projeto foi atendida, garantindo uma estabilidade estrutural até o momento. Porém, quando analisado apenas a Laje da estrutura, temos um f_{ck} minorado de 24 MPa.

Nesta mesma Tabela, é possível observar a perca de seções de concreto nas paredes e lajes da estrutura. Desta forma, temos uma média de perca de seção de 52 mm nas paredes e 75 mm em laje, sendo os locais mais afetados a Parede Oeste e Laje Sul.

É de conhecimento que a espessura da parede do poço é de 350 mm e da laje varia de 130 mm à 200 mm. Logo, ao analisar a estrutura, temos uma perda inicialmente desprezível nas paredes de 14,76 % de seu material. Em relação a laje, em alguns pontos, a porcentagem é superior a mais da metade, expondo as armaduras, colocando, assim, a estrutura da laje em risco.

- ii. Além dos ensaios de resistência a compressão, foi realizado o teste de profundidade de carbonatação para aferir o quanto o CO₂ que adentrou ao concreto podendo causar algum malefício à edificação, salientando que a medida é referente ao lado exterior da estrutura. Por conseguinte, no ensaio é possível aferir que a frente de carbonatação é pequena, onde a média é menor que 150 mm, algo satisfatório devido ao meio em que a estrutura se encontra.
- iii. O ensaio de petrografia traz algumas observações importantes. A primeira delas é a substituição total da pasta na área deteriorada por material cripto a microcristalino de birrefringência baixa, sendo referenciado pelo laboratório como possível gipsita, além do parcial preenchimento das microfissuras com este mesmo tipo de material. Nos vazios foi relatado preenchimento com material pulverulento branco. Outro ponto de bastante importância é a presença de escória potencialmente reativa em abundância, agregado graúdo com microfissuramento interno, além de sua textura ser dos tipos mortar e mirmequítica classificando-o como potencialmente reativo. Último e não menos importante ponto de observação do ensaio é a presença de matéria orgânica na área de transição entre o concreto deteriorado e concreto são. Esses três aspectos supracitados sugerem presença de material oriundo de ataque por sulfato, reação álcali-agregado e atividade microbiológica, propondo coexistência das reações deletérias. Sabe-se que a atividade microbiológica diminui bruscamente o pH na superfície do concreto, sabe-se também que etringita e taumasita são instáveis em pH baixos, nessas condições esses produtos se decompõem formando novamente gipsita, material encontrado nos resultados como produto da deterioração. Nesse contexto, a grande hipótese para o caso seria o desenvolvimento de RAA

como uma particularidade dos materiais utilizados, entretanto, como maior agente agressivo têm-se a atividade microbiológica na superfície do concreto oriunda do efluente no local, o que provocaria, em primeiro momento, um ataque ácido, abaixando o pH da superfície consideravelmente, em segundo momento evoluindo para um ataque sulfato por conta das bactérias oxidarem enxofre e produzirem ácido sulfúrico, formando então os produtos da reação entre sulfato e pasta conforme este agente agressivo adentra o concreto, lembrando que as camadas mais externas do concreto, nestas circunstâncias, sofreram ataque ácido e os produtos da reação entre sulfato e pasta são instáveis em pH baixo, fazendo com que eles se decomponham e se transformem em gipsita, que é o material encontrado como substituição da pasta do concreto. Em suma, observou-se duas frentes de ataque ao concreto simultâneas e opostas, uma extrínseca ao concreto proveniente da ação microbiológica e outra intrínseca proveniente da reação álcali agregado, a primeira com potencial de degradação bastante elevado, agindo de forma extremamente rápida e destrutiva e a segunda ainda sem atingir seu potencial de degradação visto o tempo de construção da estação elevatória. Salienta-se que à época da construção não era de conhecimento da sociedade engenheira o mecanismo de RAA, por esta razão os agregados utilizados não passaram por nenhum ensaio neste sentido, uma vez que as normas técnicas referente a esta manifestação patológica ainda não haviam sido desenvolvidas.

- iv. Não foi encontrado gel de RAA no ensaio de MEV, entretanto o laudo do laboratório não descarta a possibilidade da existência desta reação uma vez que a amostra foi bastante pontual e não podendo representar fielmente a estrutura como um todo, sugerindo avaliar esse quesito de acordo com o resultado obtido pelo ensaio de petrografia, que por sua vez direciona a um resultado positivo quanto a RAA. O ensaio de MEV também corrobora ao ataque por sulfato mostrando que a pasta tem abundante presença de enxofre. O resultado aponta também presença de alumínio e potássio nos agregados.

- v. O conhecimento e entendimento das origens das causas das manifestações patológicas são imprescindíveis não só para o tratamento, mas também para a prevenção e proteção das estruturas.
- vi. A revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa foi importante para conhecer sobre a origem e causa de manifestações patológicas em estruturas de saneamento, seus mecanismos e consequências.
- vii. É preciso conscientização de que as estruturas ligadas à coleta e tratamento de esgoto requerem cuidados especiais, não podem ser projetadas e construídas como estruturas comuns. São necessários cuidados especiais desde a concepção do projeto até sua construção. Os materiais e métodos construtivos devem ser repensados a fim de que sejam capazes de suportar a agressividade do ambiente com presença de esgoto.

Recomenda-se os seguintes estudos para continuidade desta pesquisa:

- i. Ensaios laboratoriais acelerados que simulem o ambiente da EEE afim de determinar se a aplicação do peróxido de hidrogênio, utilizado para diminuir o odor, contribuiu para a aceleração da deterioração do concreto da estrutura;
- ii. Nova análise de resistência a compressão como contra-prova;
- iii. Estudo acerca da coexistência de RAA e ataque por sulfato;
- iv. Ensaios no concreto deteriorado para verificação da formação de taumasita. Sugere-se DRX no produto de deterioração superficial e também no produto de deterioração mais próxima do núcleo do concreto;
- v. Estudar a formação da taumasita decorrente do ataque de sulfato e seu papel como produto expansivo e nocivo ao concreto;
- vi. Verificar a influência da temperatura na formação da taumasita, uma vez que temperaturas baixas parecem ser mais favoráveis à sua formação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 – Concreto – Ensaios de Compressão de Corpos de Provas Cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680 – Concreto – Extração, Preparo, Ensaios e Análise de Testemunhos de Estruturas de Concreto, Parte 1: Resistência à Compressão Axial**. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681 – Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003

ALVES, Rogério. **Resistência mecânica de concreto de cimento Portland: correlação de ensaio à compressão axial com esclerometria**. Monografia Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2017.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C856 – Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete**. 2013.

AZEVEDO, Minos Trocoli de. **Patologia das Estruturas de Concreto**: In: Isaia, g. c. (ed.) concreto: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de Construção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BOLINA, Fabricio Longhi, TUTIKIAN, Bernardo Fonseca, HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Patologia de estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

CAVALCANTE, J.E; **Sistema de interceptação Pinheiros**. Disponível em <https://www.institutodeengenharia.org.br/site/2018/02/27/sistema-de-intercepcao-pinheiros/> . Acesso em Julho de 2019.

CETESB. **Qualidade das Águas Superficiais no Estado de São Paulo - Apêndice D – Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade**. CETESB, 2013.

CETESB. **Qualidade das Águas Superficiais no Estado de São Paulo | Apêndice D - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade**. São Paulo, 2013.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Durabilidade: Ataque por sulfatos**. Notas de aula. Faculdade de engenharia da universidade do Porto. Porto, 2001. Disponível em: < http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819_Patologia_e_Recuperacao_de_Estruturas_de_Concreto/ATAKSulfato.pdf>. Acesso em: 21 de agosto de 2019.

CRAMMOND, N.J. **The thaumasite form of sulfate attack in the UK**. Cement & Concrete Composites, Vol. 25 p. 809-818, 2003.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. Editora LTC, 5ª edição, 360p. Rio de Janeiro 2007.

GÓIS, T.S. - **Estudo da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) em estruturas de concreto**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

HAMASSKI, L.T.; SANTOS, R.F.C. **Corpos de Prova. Soluções inovadoras**. Revista Notícia da Construção. Pg. 48-49, 2013

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: Ibracon, 2010.

JR. Kudlanvec Lorival Vitor; CANALLE Rafael; NUNES Laia K. Tuane; REZENDE de C.R.C. Elaine; CORREIA Dione Melissa. **Levantamento de Manifestações Patológicas em Estação de Esgoto: Estudo de Caso em Reator UASB**. Revista Técnico-Científica do CREA-PR. Parana. ISSN: 2358-5420. Disponível em: <file:///C:/Users/usuario/Downloads/419-1480-1-PB.pdf> Acesso em Julho/2019.

L A, Professor Clark. **Thaumasite Expert Group Report: Review after three years experience**. Concrete, 2002. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/429277/thaumasite_three_year_review.pdf> Acesso em: 18 set. 2019.

LUCENA, Plácido José Lins de. **As patologias do concreto causadas por ataques de sulfato: A thaumasita e seus mecanismos de formação e degradação**. 80f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Centro Universitário de João Pessoa (UNIPÊ), 2017.

MALISKA, Ana Maria. **Microscopia eletrônica de varredura e microanálise**. Universidade federal de Santa Catarina. Santa Catarina.

MEDEIROS, Eloisa. **Doenças Concretas**. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/160/artigo287763-2.aspx>>. Acesso em: Julho de 2019.

MENEZES Trifler Menezes; NOVAES Oliveira de Gabriel; MORAES de Macena Juliana; TOMA Sayuri Karina; RODRIGUES Silvia da Victoria. **Estudo da ETE do Município de Jacareí**. São Paulo, 2017.

MEHTA, P. K. **Effect of fly ash composition on sulfate resistance of cement**, ACI Journal Proc 83,1986.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PARKER, Dave. **Sulphate attack hits M5 bridges. 1998**. Disponível em: <<https://www.newcivilengineer.com/sulphate-attack-hits-m5-bridges/842235.article>>. Acesso em: 25 de agosto de. 2019.

PINHEIRO-ALVES, Maria Teresa; GOMÀ, Ferrán; JALALI, Said. **Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos**. In: CONGRESSO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO. 3. 2007, Évora. Anais. Coimbra, 2007.

RIBEIRO, Daniel, SALES, Almir, TUTIKIAN, Bernardo Fonseca, SOUSA, Carlos Alberto Caldas, ALMEIDA, Fernando do Couto Rosa, CUNHA, Manuel Paulo Teixeira, LOURENÇO, M. Zita, CASCUDO, Oswaldo, HELENE, Paulo. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto**. Elsevier. Rio de Janeiro, 2018.

Rock-Color Chart Committee, Geological Society of America and Rock-Color Chart Committee. **Rock-color chart**. Geological Society of America, New York. 9p, 1963.

SKALNY, Jan P., MARCHAND, Jacques, ODLER, Ivan. **Sulfate attack on concrete**. CRC Press, Londres, 2002.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estrutura de Concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

STUART, Matthew D. **Petrographic Analysis of Concrete Deterioration**. Disponível em <https://pdhonline.com/courses/s177/s177content.pdf>. Acesso em Março de 2020.

7. ANEXO A – Fotos da EEE Pinheiros



Foto 1 – Vista Interna da EEE Pinheiros



Foto 2 – Condição da parede do vertedouro



Foto 3 – Condição da barra de aço da estrutura



Foto 4 – Condição da laje superior da estrutura



Foto 5 – Parede mais interna da EEE Pinheiros



Foto 6 – Vista interna da EEE Pinheiros