

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**THAÍS DE SOUZA GÓIS**

**ESTUDO DA CORROSÃO DO CONCRETO  
MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA (CCMI) EM ESTRUTURAS DE  
SANEAMENTO**

**Vitória**

**2016**

THAÍS DE SOUZA GÓIS

**ESTUDO DA CORROSÃO DO CONCRETO  
MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA (CCMI) EM ESTRUTURAS DE  
SANEAMENTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Geilma Lima Vieira

**Vitória**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

G616e Góis, Thaís de Souza, 1987-  
Estudo da corrosão do concreto microbiologicamente  
induzida (CCMI) em estruturas de saneamento / Thaís de Souza  
Góis. – 2016.  
164 f. : il.

Orientador: Geilma Lima Vieira.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Biodegradação. 2. Concreto – Corrosão. 3. Durabilidade  
(Engenharia). 4. Bactérias. 5. Microorganismos. 6. Corrosão do  
concreto microbiologicamente induzida (CCMI). I. Vieira, Geilma  
Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

---

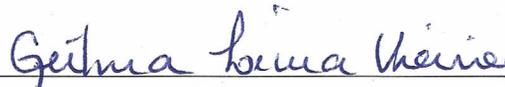
# UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

## ESTUDO DA CORROSÃO DO CONCRETO MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA (CCMI) EM ESTRUTURAS DE SANEAMENTO

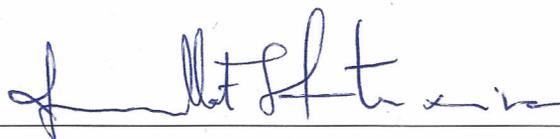
**Thais de Souza Gois**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

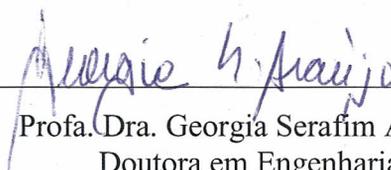
Aprovada no dia **07 de julho de 2016** por:



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira  
Doutora em Engenharia Civil  
Orientadora - UFES



Profa. Ph.D. Jamilla Teixeira  
Ph.D. em Engenharia Civil  
Examinadora Interna - UFES



Profa. Dra. Georgia Serafim Araújo  
Doutora em Engenharia Civil  
Examinadora Externa - UFES

Vitória – ES, julho de 2016

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha vida, saúde, pela garra e persistência para concluir esta dissertação.

Aos meus amados pais, Marlene e Roberto pelo apoio incondicional de sempre e pela paciência nesta fase de dedicação e sacrifícios. Ao meu irmão Daniel pelo apoio, amor e carinho mesmo que de longe.

Ao meu grande amigo e noivo Cássio, por todo amor e compreensão nesta etapa e também por ter me ajudado diretamente com a pesquisa em tantos momentos. À sua família que tanto me incentiva e me apóia, muito obrigada!

A querida orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Geilma Lima Vieira pela oportunidade, otimismo e apoio na pesquisa.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Jamilla Teixeira por ter iniciado comigo no mestrado, pela compreensão e parceria de sempre.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Geórgia Serafim pela disponibilidade e pronta ajuda sempre que precisei.

Ao querido Prof. Dr. Ricardo Franci, pela enorme gentileza e ajuda, contribuindo e me atendendo sempre com tamanha boa vontade.

À colega e pesquisadora Dr<sup>a</sup> Claudia Teles pelas inúmeras portas que me abriu, por todo networking e grande disponibilidade em ajudar.

Ao Prof. Dr. Sérgio Túlio que mesmo sem obrigação formal me atendeu, aconselhou e tirou dúvidas nas inúmeras vezes em que a ele recorri.

À querida Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sayonara Pinheiro, pelo carinho e boa vontade contagiante, por ter me ajudado com tantos materiais, mesmo que só a tenha procurado quase ao final da pesquisa.

Aos demais professores da UFES com quem tive a honra de aprender e amadurecer.

À FAPES pela bolsa concedida e apoio fundamental na pesquisa.

À UFES, ao PPGEC e ao CT pelo financiamento às idas aos congressos e por ter sido a minha segunda casa por mais dois anos.

Aos colegas da Prefeitura Universitária, Francesco Mayer e Maria de Fátima Frechiane pela enorme ajuda na procura por projetos da UFES, por toda gentileza e carinho. Ao Diego Palaoro pelo imenso e indispensável auxílio nas vistoriais das fossas sépticas da UFES.

À querida Ana Maria de Matos Mariani, bibliotecária documentalista da Biblioteca Central da UFES por ter me ensinado a fazer pesquisa, me ajudado a encontrar tantos artigos valiosos para esta dissertação, por ser tão atenciosa e dedicada ao seu trabalho.

À CESAN por ter aprovado a minha pesquisa e me permitido realizar as vistorias das ETE. Agradeço ao Fernando Baptista, à Priscila Pires, à Juciane Motta e a todos os funcionários, sem exceção, sempre tão gentis e solícitos.

À Serra Ambiental, por ter aceito que eu realizasse as vistorias na ETE, em especial à Ericka Marin e à Renata Guimarães.

Aos técnicos do LEMAC, Loreato, Márcio, Henrique, Juliana e Vinicius pela ajuda e companhia diárias.

Aos queridos amigos do mestrado Sérgio, Max, Wagner Klippel, Argeu, Leticia, Regiane, Jessica, Wagner, Felipe, Janaina, Larissa, Júlia, Gustavo, Camila, Maria Juliana, Guilherme e demais colegas com quem tive o prazer de conviver. Em especial agradeço aos queridos amigos Sérgio e Max, por tornaram mais engraçado e divertido estes últimos dois anos e à minha querida amiga e parceira de vida e estudos Clarisse Pacheco, por me ensinar, me ajudar e dividir tantos momentos alegres comigo.

À todos os meus familiares que me apóiam e torcem pelo meu sucesso.

Aos meus queridos amigos da vida, por entenderem a minha ausência e comemorarem comigo cada conquista.

À todos que confiaram em mim e me apoiaram! Obrigada!

## RESUMO

A perda de desempenho do concreto está ligada a processos de deterioração de natureza complexa, podendo ser atribuída a fatores intrínsecos ou extrínsecos ao material. Dentre os agentes agressivos, estão os agentes biológicos, os quais dão origem a vários processos de deterioração, devido à ação do metabolismo de organismos vivos. Estes processos são chamados de biodeterioração. Nos sistemas de saneamento, a corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) é um tipo de biodeterioração muito frequente. A CCMI é caracterizada pela atividade bacteriana, a qual pode conduzir à bioformação de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Em condições anaeróbias, as bactérias redutoras de sulfato (BRS) presentes na lama de esgoto reduzem os compostos de enxofre a gás sulfídrico ( $H_2S$ ) e este gás será transformado em  $H_2SO_4$ , por meio da ação das bactérias oxidantes de enxofre (BOE), o qual irá corroer o concreto. Esta dissertação trata-se de uma revisão bibliográfica acerca dos mecanismos da CCMI e principais pesquisas sobre o tema, onde foi realizada um amplo estado da arte, uma linha do tempo com as principais pesquisas sobre o tema e uma tabela sistematizando os principais métodos de prevenção da CCMI. Além disto, foram realizados dois estudos de caso. O primeiro foi realizado nas fosses sépticas da UFES e o outro em duas estações de tratamento de esgoto (ETE) da CESAN, no intuito de identificar na prática a ocorrência da CCMI nestas estruturas. Durante as vistorias foram identificadas manifestações patológicas que corroboram a hipótese de CCMI, conforme mencionado na literatura, como: perda de massa do concreto, desagregação do agregado graúdo, presença de substância esbranquiçada, fissuração, dentre outras.

Palavras-chave: biodeterioração, concreto, CCMI, durabilidade, microrganismos, bactérias, esgoto.

## ABSTRACT

The loss of concrete performance is related to the complex nature of deterioration processes, which can be attributed to intrinsic or extrinsic factors to the material. Among the aggressive agents, there are biological agents, which give rise to the deterioration processes, by the action of the metabolism of living organisms. These processes are called biodeterioration. In sanitation systems, microbiologically induced concrete corrosion (MICC) is a type of biodeterioration very frequent. MICC is characterized by the bacterial activity, which may lead to sulfuric acid bio-formation ( $H_2SO_4$ ). In anaerobic conditions, the sulfate reducing bacteria (BRS) in the sewage sludge reduces the sulfur compounds to hydrogen sulfide ( $H_2S$ ). This gas is converted to  $H_2SO_4$  by the action of sulfur oxidising bacteria (BOE), which will corrode the concrete. This research is a literature review about the mechanisms of the MICC, where a large state of the art was held, a timeline with major research on the subject and a table systematizing the main methods of prevention os MICC. In addition, there were two case studies. The first was held in septic fosses in UFES and the other in two sewage treatment plants (WWTP) of CESAN in order to identify in practice the occurrence of CCMI on these structures. During the surveys pathological manifestations have been identified to support the hypothesis of CCMI, as mentioned in the literature, such as: loss of mass concrete, breakdown of coarse aggregate, presence of whitish substance, cracking, among others.

Keywords: biodeterioration, concrete, MICC, durability, microorganisms, bacterias, sewage.

## SUMÁRIO

<b><u>LISTA DE FIGURAS</u></b>	<b>10</b>
<b><u>LISTA DE QUADROS</u></b>	<b>12</b>
<b><u>LISTA DE TABELAS</u></b>	<b>13</b>
<b><u>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS</u></b>	<b>14</b>
<b><u>1 INTRODUÇÃO</u></b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 OBJETIVO GERAL	25
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA	25
1.4 ESTRUTURA METODOLÓGICA	26
<b><u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u></b>	<b>28</b>
2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO	28
2.1.1 FASES CONSTITUINTES	28
2.1.2 REAÇÕES DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	30
2.2 DURABILIDADE	31
2.2.1 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	33
2.2.2 GRAU DE AGRESSIVIDADE	34
2.2.3 POROSIDADE E PERMEABILIDADE	36
2.3 DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	38
2.3.1 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	38
2.3.2 PROCESSOS MECÂNICOS DE DETERIORAÇÃO	39

	8	
2.3.3	PROCESSOS FÍSICOS DE DETERIORAÇÃO	40
2.3.4	PROCESSOS QUÍMICOS DE DETERIORAÇÃO	40
2.3.5	PROCESSOS BIOLÓGICOS DE DETERIORAÇÃO	50
<b>3</b>	<b>ASPECTOS ESPECÍFICOS SOBRE BIODETERIORAÇÃO E CCMÍ</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>BIODETERIORAÇÃO</b>	<b>53</b>
3.1.1	GENERALIDADES	54
3.1.2	CLASSIFICAÇÃO	57
3.1.3	BIORECEPTIVIDADE	58
3.1.4	A FORMAÇÃO DO BIOFILME	59
3.1.5	BACTÉRIAS ENVOLVIDAS	61
3.1.6	O CICLO DO ENXOFRE	64
<b>3.2</b>	<b>CORROSÃO DO CONCRETO INDUZIDA MICROBIOLOGICAMENTE (CCMI)</b>	<b>66</b>
3.2.1	REDES DE SANEAMENTO	66
3.2.2	PROCESSOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS NAS REDES DE SANEAMENTO	70
3.2.3	O MECANISMO DA CCMÍ	72
3.2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DA CCMÍ	78
3.2.5	FORMAS DE MEDIÇÃO DA CCMÍ	90
<b>4</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>94</b>
<b>4.1</b>	<b>A EVOLUÇÃO DO ESTUDO SOBRE A BIODETERIORAÇÃO</b>	<b>94</b>
<b>4.2</b>	<b>MÉTODOS DE PREVENÇÃO DA CCMÍ</b>	<b>103</b>
4.2.1	CONTROLE DA PRODUÇÃO E EMISSÃO DE H <sub>2</sub> S:	104
4.2.2	CONTROLE DO ATAQUE QUÍMICO	106
4.2.3	CONTROLE DA ATIVIDADE MICROBIANA	107
4.2.4	CONTROLE MECÂNICO	109
<b>4.1</b>	<b>ARGUMENTAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE A CCMÍ</b>	<b>111</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>115</b>

<b>5.1</b>	<b>ESTUDO DE CASO 1: UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO</b>	<b>115</b>
5.1.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS INSPEÇÕES DO ESTUDO DE CASO 1	122
<b>5.2</b>	<b>ESTUDO DE CASO 2: ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) DA CESAN</b>	<b>122</b>
5.2.1	ETE CAMBURI	123
5.2.2	ETE FEU ROSA	126
5.2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS INSPEÇÕES DO ESTUDO DE CASO 2	128
<b>5.3</b>	<b>ARGUMENTAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS DE CASO</b>	<b>129</b>
<b><u>6</u></b>	<b><u>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u></b>	<b><u>134</u></b>
<b><u>7</u></b>	<b><u>REFERÊNCIAS</u></b>	<b><u>137</u></b>
<b><u>8</u></b>	<b><u>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</u></b>	<b><u>152</u></b>
<b><u>ANEXO A</u></b>		<b><u>158</u></b>
<b><u>ANEXO B – FICHA DE INSPEÇÃO</u></b>		<b><u>164</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de CCMI em tubulações de esgoto .....	18
Figura 2: Exemplos de estruturas de esgoto em concreto com CCMI .....	19
Figura 3: Gráfico das mudanças das propriedades dos materiais com o tempo .....	21
Figura 4: Galerias de concreto de obra de saneamento em Vitória- ES .....	22
Figura 5: Exemplo de estrutura de saneamento em colapso .....	23
Figura 6: Gráfico do custo de reabilitação/construção de estruturas de saneamento - 2008 e 2009 .....	23
Figura 7: Organograma estrutura metodológica da pesquisa .....	26
Figura 8: Representação esquemática das zonas de hidratação do concreto .....	30
Figura 9: Relação entre Desempenho e Durabilidade.....	32
Figura 10: Exemplos de deterioração de materiais ao longo do tempo.....	38
Figura 11: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio ..	44
Figura 12: Modelo de ataque em material de base cimentícia por $MgSO_4$ .....	46
Figura 13: Imagem da etringita em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	48
Figura 14: Imagem da gipsita em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	48
Figura 15: Parâmetros que levam à biodeterioração.....	54
Figura 16: Exemplos de organismos vivos que podem causar biodeterioração a) molusco b) algas e líquens c) fungos d) crustáceos .....	55
Figura 17: Parâmetros que levam à biodeterioração analisados nesta pesquisa: ....	56
Figura 18: Formação do biofilme bacteriano .....	60
Figura 19: Formação de biofilme em estrutura de concreto pelo MEV.....	61
Figura 20: Imagem de microscópio eletrônico de <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> .....	63
Figura 21: O ciclo do enxofre .....	65
Figura 22: Proporção da população com saneamento básico em 2015.....	67
Figura 23: Gráfico dos materiais mais utilizados na construção de redes de esgoto na Alemanha .....	68
Figura 24: Gráfico da vida útil das estruturas de saneamento na Alemanha .....	69
Figura 25: Gráfico dos principais danos nas estruturas de esgoto da Alemanha.....	69
Figura 26: Prejuízos associados à biodeterioração de sistemas de saneamento .....	70
Figura 27: Representação da biodeterioração em uma tubulação de esgoto .....	72

Figura 28: Mudanças físicas e químicas teóricas das propriedades do concreto ao longo do processo de biodeterioração .....	74
Figura 29: Camadas de concreto após CCMI .....	78
Figura 30: Gráfico da perda de massa no tempo com diferentes teores de cimento	79
Figura 31: gráfico da relação entre $a/c$ e a perda de massa .....	80
Figura 32: Gráfico da relação do consumo de agregado graúdo e perda de massa.	82
Figura 33: Relação dos fatores que afetam a porosidade e resistência do concreto	83
Figura 34: Câmaras de simulação de CCMI em laboratório.....	96
Figura 35: Seção do <i>Virginia Experimental Sewer</i> .....	98
Figura 36: Linha do tempo dos principais estudos de CCMI no mundo .....	101
Figura 37: Métodos de Prevenção da CCMI .....	104
Figura 38: Técnicas químicas e biológicas para controle de $H_2S$ .....	104
Figura 39: Imagem de Satélite delimitando a área do estudo de caso na UFES ....	115
Figura 40: Delimitação dos Centros da UFES.....	116
Figura 41: Planta de drenagem – CEMUNI.....	117
Figura 42: Fotos de 4 fossas do CEMUNI.....	118
Figura 43: Planta de drenagem - CCJE .....	118
Figura 44: Fotos de 3 fossas diferentes do CCJE.....	119
Figura 45: Planta de drenagem – IC .....	120
Figura 46: Fotos de 3 fossas diferentes do IC.....	120
Figura 47: Planta de drenagem - CT .....	121
Figura 48: Fotos de 4 fossas diferentes do CT.....	121
Figura 49: Imagem aérea ETE Camburi.....	123
Figura 50: Caixa de chegada em colapso .....	124
Figura 51: Interior da caixa de chegada .....	125
Figura 52: Desarenador da ETE Camburi .....	125
Figura 53: Detalhe mostrando a deterioração do desarenador .....	126
Figura 54: Reatores 1 e 2 de Feu Rosa .....	126
Figura 55: Imagens do Reator 1 .....	127
Figura 56: Imagens do Reator 2.....	127
Figura 57: Tratamento preliminar ETE de Feu Rosa.....	128
Figura 58: Desarenador ETE de Feu Rosa .....	128

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades dos principais componentes do cimento Portland .....	31
Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental às estruturas de concreto.....	34
Quadro 3 - Ácidos envolvidos na deterioração do concreto .....	49
Quadro 4 - Características de crescimento das BOE.....	64
Quadro 5: Sistematização dos métodos de controle e prevenção de CCMI em estruturas de saneamento.....	110
Quadro 6 - Diferentes pesquisas mostrando perda de massa em materiais cimentícios .....	131
Quadro 7 - Estudos sobre biodeterioração.....	158

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto	35
Tabela 2: Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal....	35
Tabela 3: Relação entre concentração de H <sub>2</sub> S e taxa de corrosão .....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PIB	Produto Interno Bruto
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
BOE	Bactérias Oxidantes de Enxofre
BOEN	Bactérias Oxidantes de Enxofre Neutrófilas
BOEA	Bactérias Oxidantes de Enxofre Acidófilas
EPS	Exopolissacarídeos
CMI	Corrosão Microbiologicamente Induzida
CCMI	Corrosão do Concreto Microbiologicamente Induzida
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
OD	Oxigênio Dissolvido
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
CP	Cimento Portland
CAC	Cimentos Aluminato de Cálcio
Ca(OH <sub>2</sub> )	Hidróxido de cálcio – Portlandita
C-S-H	Silicatos hidratados
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de Cálcio
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de Sódio
MgSO <sub>4</sub>	Sulfato de Magnésio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
H <sub>2</sub> S	Gás Sulfídrico ou Sulfeto de Hidrogênio
HS <sup>-</sup>	sulfeto
S <sup>0</sup>	Enxofre Elementar
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato

# CAPÍTULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado no Brasil e no mundo, seja em edifícios residenciais, comerciais ou industriais, obras de arte (pontes, túneis e viadutos) ou obras de infraestrutura como estradas, barragens e instalações de saneamento de água e esgoto. Tais estruturas, por estarem expostas à ação do meio ambiente em que se encontram, podem sofrer deterioração total ou parcial ao longo do tempo, o que irá interferir em sua durabilidade e desempenho (PINHEIRO, 2003).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), nenhum material apresenta durabilidade eterna, sendo admitidas mudanças em suas propriedades com o passar do tempo. Para os autores, um material atinge o fim da sua vida útil quando perde suas propriedades de tal forma que seu uso se torna inseguro ou antieconômico. Todavia, é preocupante estas mudanças estarem, em muitos casos, ocorrendo precocemente.

A crescente preocupação com a qualidade das construções justifica a maior atenção dispensada às especificações de projeto que garantam, não apenas a segurança com relação à capacidade resistente e de utilização, mas principalmente a durabilidade e bom desempenho das estruturas, face aos agentes agressivos eventualmente presentes no ambiente em que se encontram (BRANDÃO, 1998).

Segundo Souza e Ripper (1998), a perda de desempenho do concreto está ligada a processos de deterioração de natureza complexa, podendo ser atribuída a fatores intrínsecos ou extrínsecos ao material. Os aspectos intrínsecos são relativos às peculiaridades dos constituintes deste compósito (cimento, agregados, água, aço, adições e aditivos), às suas misturas e reações internas (relação água/aglomerante, aditivos, etc.) e ainda à sua execução (procedimentos de concretagem, fôrmas ou condições de cura) Já os aspectos extrínsecos levam em conta a existência de substâncias agressivas do meio, condições do clima, dentre outros.

Para Lima (2005) é imprescindível conhecer o meio ambiente onde a estrutura estará inserida para o completo entendimento do seu comportamento. Os ambientes urbanos, marinhos, industriais e águas servidas podem provocar a redução da vida útil das estruturas, ainda que devidamente especificadas e executadas.

Os mecanismos deletérios ao concreto podem ser de natureza química, física, mecânica ou biológica. As causas mecânicas podem ser: impacto, abrasão, erosão ou cavitação do material. As causas físicas compreendem os efeitos de altas temperaturas, as diferenças de coeficientes de dilatação térmica entre agregado e pasta e gelo e degelo. As causas químicas podem ser internas ao material (como as reações álcali-agregado) ou externas, como a ação de íons agressivos (cloretos, sulfatos, dióxido de carbono, entre outros), as quais irão provocar o surgimento de produtos expansivos no interior do material (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para Mehta e Monteiro (2008), as reações químicas envolvendo a formação de produtos expansivos causados pelo ataque de íons sulfato causam efeitos danosos ao concreto. Se nas primeiras idades da estrutura as expansões internas não provocam danos, com o tempo o aumento destas tensões gera graves manifestações patológicas tais como: fechamento de juntas de dilatação, deslocamentos em diferentes partes da estrutura, fissuração ou lascamentos.

As causas de natureza biológica, segundo Sanchez e Rosowsky (2008), ocorrem quando há o envolvimento de seres vivos na deterioração dos materiais, seja macrorganismos (moluscos, crustáceos ou insetos) ou microrganismos como fungos, algas e bactérias, esse processo é chamado de biodeterioração. Diversos estudos indicam a atuação de organismos vivos neste processo.

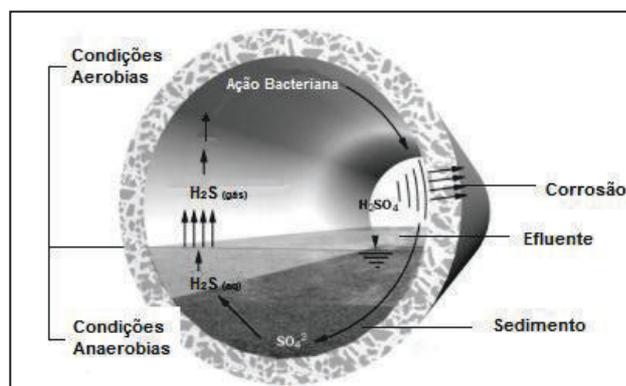
A biodeterioração pode ocorrer em estruturas de concreto ou outros materiais, sejam localizados em ambientes marinhos, como pontes e píeres, ou em edificações convencionais, sendo muito frequentemente encontrada em estruturas de saneamento (JOORABCHIAN, 2010; WEI *et al.*, 2010). Segundo Monteny *et al.* (2000), um processo complexo envolvendo a atividade metabólica de diversos microrganismos presentes em ambientes com esgoto leva à formação de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a partir da oxidação do gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) presente no interior das estruturas. O ataque contínuo e o ingresso deste ácido no concreto geram graves danos às estruturas, o que resultará conseqüentemente, em reabilitações dispendiosas ou na substituição completa das mesmas.

Em redes de saneamento, os danos ao concreto podem ocorrer por ações de natureza puramente química, devido às reações diretas de águas sulfatadas com a pasta de cimento hidratada, dando origem a compostos expansivos deletérios dos tipos etringita, gipsita e taumasita. Ou ainda, tais agentes químicos deletérios podem ter uma origem indireta, resultante de atividade microbiológica, causando uma deterioração, conhecida na literatura internacional como *microbiologically induced corrosion (MIC)* (corrosão microbiologicamente induzida).

Segundo Joorabchian (2010), a CCMI em sistemas de saneamento pode se manifestar em caixas de ligação ou inspeção, coletores e galerias de esgoto, bueiros, poços de visita, estações elevatórias de bombeamento ou estações de tratamento de efluentes (ETE), por tais ambientes terem condições adequadas para a produção de  $H_2S$  e proliferação de inúmeras espécies de bactérias.

A Figura 1 demonstra o processo da CCMI segundo Romanova *et al.* (2015). Os autores explicam que, em condições anaeróbias, ou seja, na ausência de oxigênio, na lama que se acumula no fundo das estruturas de esgoto as bactérias redutoras de sulfato (BRS) podem reduzir os compostos de enxofre presentes no esgoto e transformá-los em gás sulfídrico ( $H_2S$ ). Este gás, por meio da ação de outras bactérias, as bactérias oxidantes de enxofre (BOE), é transformado em ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) o qual, por ser altamente corrosivo, irá reagir com os compostos do cimento e, por conseguinte, causar danos severos ao concreto.

Figura 1: Processo de CCMI em tubulações de esgoto



Fonte: Romanova et al. (2015)

Além dos danos que tornam necessárias as manutenções regulares das estruturas, ou que podem ainda levar à sua ruína completa, como mostra a Figura 2, gerando enormes prejuízos financeiros, a produção de  $H_2S$  em redes de esgotos também está relacionada a danos ambientais e problemas de odor (típico de ovo podre) (JENSEN, 2009). Este gás pode causar riscos significativos à saúde humana. Segundo Nielsen *et al.* (2008), todo ano, muitos trabalhadores de empresas de saneamento têm a saúde comprometida ou perdem a vida pela exposição à níveis muito tóxicos de  $H_2S$ . Além disto, são comuns reclamações e ações judiciais da população junto às companhias de saneamento pelo mundo (HERISSON, 2012).

Por ser um gás de ocorrência comum, seu efeito tóxico e letal em pequenas concentrações é muito negligenciado, porém, sabe-se que em uma concentração acima de 0,03% no ar, ou seja, 300ppm, pode levar a óbito (POMEROY, 1974). Portanto, é grande o esforço para compreender e encontrar meios que possam minimizar os seus efeitos deletérios para a população, as cidades, o meio ambiente e as estruturas de uma forma geral.

Figura 2: Exemplos de estruturas de esgoto em concreto com CCMI



Fonte: Motsieloa, (2012)

A produção de  $H_2S$  desempenha um papel importante na ocorrência da CCMI em estruturas de saneamento. Além disto, fatores intrínsecos ao material como a composição do cimento, uso de adições, características do agregado, dentre outros, e fatores extrínsecos como a temperatura e umidade do meio, também favorece a CCMI. No mais, o próprio estilo de vida da população influencia na CCMI de muitas formas (SAND *et al.*, 1994). Segundo Sand *et al.* (1994) e Herisson (2012), alguns fatores principais levam à produção de  $H_2S$  nas redes:

- Superdimensionamento dos sistemas de esgoto, para atender o aumento do número de pessoas que vivem nas áreas periféricas, propiciando grande acúmulo de sedimentos, principalmente em locais planos;
- Redução do consumo de água, que leva a limitar as taxas de fluxo do efluente e favorecer uma maior detenção hidráulica;
- Aumento das temperaturas (maior uso de máquinas de lavar roupa e louça, banhos quentes), aumentando as taxas de reações bioquímicas;
- O aumento do uso de detergentes causando a acidificação do meio.

Para Sun (2015), a manutenção das redes de saneamento depende da estimativa da taxa de corrosão, a qual pode ser muito imprecisa devido à má compreensão dos detalhes do processo. Toda interrupção de uma unidade em operação é acompanhada de custos elevados e transtornos para a população, logo, quanto maior o entendimento dos processos da CCMI, maior o impacto benéfico, a nível mundial, no aumento da vida útil e na redução de custos de reparação ou substituição das estruturas de saneamento em concreto.

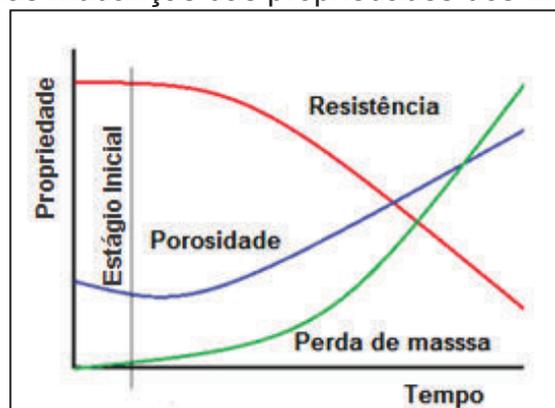
Apesar de haver muitos estudos sobre a biodeterioração em estruturas de concreto, principalmente a nível internacional, o tema ainda é desafiador, já que os processos envolvendo os mecanismos CCMI são complexos e controversos. Portanto, no intuito de aumentar o desempenho e a durabilidade das estruturas de concreto, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo pesquisas na área, para ampliar o conhecimento dos diferentes mecanismos de deterioração dos materiais de construção e desenvolver métodos de prevenção e tratamento das manifestações patológicas a eles relacionadas (PINHEIRO, 2003).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

São inúmeros os agentes agressivos responsáveis pela deterioração do concreto. Dentre eles, podem-se citar os agentes biológicos, como os microrganismos, que dão origem aos processos de deterioração ao interagirem com os materiais e o meio ambiente em que se encontram. Quando estes processos deletérios envolvem a ação de microrganismos, tem-se a biodeterioração (PINHEIRO e SILVA, 2011).

A biodeterioração pode ser descrita como quaisquer mudanças indesejáveis nas propriedades dos materiais causadas pela atividade de organismos vivos (VIDELA, 2003). O estudo deste processo é multidisciplinar, já que envolve conceitos de engenharia, química e biologia. A perda destas propriedades pode levar ao colapso das estruturas ao longo do tempo. A Figura 3 mostra as fases de iniciação e de desenvolvimento da biodeterioração, com a tendência de mudanças que ocorrem nas propriedades do material (MÁRQUEZ *et al.*, 2013). Para os autores, na fase inicial, a bioreceptividade dos materiais, ou seja, a sua capacidade intrínseca de permitir a colonização de organismos vivos possui um papel significativo no processo. É o nível de bioreceptividade que irá favorecer ou não o crescimento de microrganismos no material. Durante a fase de desenvolvimento do processo, a atividade microbológica irá facilitar o ataque químico e conseqüentemente a integridade do material, aumentando sua porosidade e sua perda de massa e reduzindo sua resistência.

Figura 3: Gráfico das mudanças das propriedades dos materiais com o tempo



Fonte: Márquez *et al.*, (2013)

Em estruturas de saneamento um dos principais processos de biodeterioração, conhecido como corrosão microbiologicamente induzida (CCMI), pode causar a deterioração severa no concreto, do aço e demais materiais utilizados em sua construção, além de danos aos equipamentos elétricos e mecânicos que compõe os sistemas. Isto faz com que estruturas projetadas para durarem de 50 a 100 anos apresentem vida útil reduzida a apenas 10 ou 20 anos (US-EPA, 1991).

A nível global a maior parte das estruturas de saneamento, desde a coleta até o tratamento do afluente, é construída em concreto. Segundo Joorabchian (2010), cerca de 40% dos sistemas de saneamento dos EUA são feitos com este material. No Brasil, a grande maioria das estruturas relacionadas ao tratamento de esgoto também são feitas em concreto. A Figura 4 mostra uma obra de saneamento, em Vitória – ES, onde as galerias e vigas de apoio são feitas em concreto pré-fabricado.

Figura 4: Galerias de concreto de obra de saneamento em Vitória- ES



Fonte: A autora (2016)

Obras deste tipo, quando não recebem tratamento adequado para prevenção da CCMI, estão sujeitas à deterioração precoce, o que representa prejuízos financeiros, sociais e ambientais. Segundo US-EPA (1991), a abertura inesperada de crateras nas vias pode estar associada a este tipo de problema, por haver galerias de esgoto subterrâneas pelas cidades. Os prejuízos ambientais passam pela contaminação do solo e do lençol freático, devido ao vazamento de esgoto contaminado e não tratado no ambiente o que representa grande risco ambiental e para a saúde pública. Segundo Kaempfer e Berndt (1999), estima-se que, em muitos casos, por ano, 500 milhões de m<sup>3</sup> de águas contaminadas, provenientes de instalações sanitárias, sejam infiltradas para o solo e lençol freático, por diversas razões.

A Figura 5 mostra três exemplos de estruturas de saneamento em colapso. A primeira mostra um vazamento de tubulação de esgoto, a segunda a abertura de uma cratera no pavimento onde havia galerias de esgoto subterrâneas e a terceira mostra uma tubulação deteriorada (BAIRD, 2013). Em muitas localidades, porém, o problema da corrosão no esgoto não é reconhecido até que ocorram danos mais

graves e extensos, como o colapso das estruturas ou falha de equipamentos, embora o custo para reparo ou substituição das estruturas com CCMI exceda, em muito, os custos do seu controle preventivo (US-EPA, 1991).

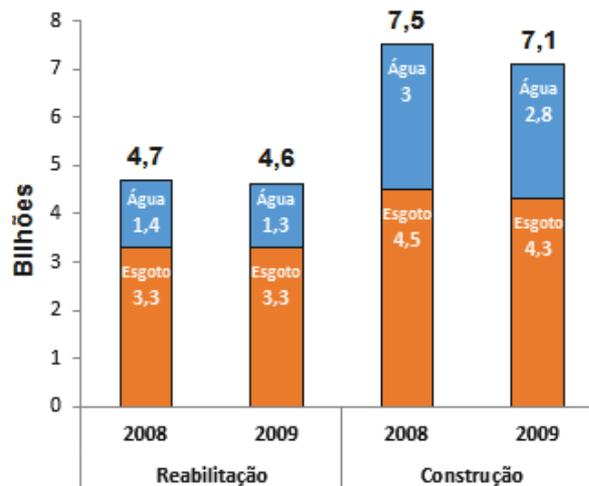
Figura 5: Exemplo de estrutura de saneamento em colapso



Fonte: BAIRD (2013)

Em diversos países a CCMI gera custos anuais bilionários. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US-EPA, 2010) mostra, na Figura 6, o custo com a reabilitação e novas construções de estruturas de água e esgoto em 2008 e 2009. Em 2008 o custo com a reabilitação das estruturas foi de \$3,3 bilhões e com novas construções foi de \$4,5 bilhões. Em 2009 o valor com as reabilitações permaneceu igual, e o de novas construções caiu para \$4,3 bilhões. Não foi mencionado no estudo o percentual atribuído exclusivamente à CCMI.

Figura 6: Gráfico do custo de reabilitação/construção de estruturas de saneamento - 2008 e 2009



Fonte: US-EPA (2010)

No Reino Unido estima-se um gasto anual de £104 bilhões (OFWAT, 2004 *apud* ROMANOVA *et al.*, 2014). Na Alemanha são gastos \$100 bilhões anualmente,

sendo 40% dos danos associados à biodeterioração (KAEMPFER e BERNDT, 1999). No Japão e na Austrália cerca de 1 a 5% do PIB de cada país é gasto com manutenção destas estruturas (LITTLE e LEE, 2009). Na região de Flandres na Bélgica, a CCMI representa 10% das despesas totais com o tratamento de esgoto (VINCKE, 2002).

Embora as consequências resultantes da CCMI sejam difíceis de serem quantificadas com precisão pela dificuldade de separá-la de outros processos deletérios nas estruturas, já que a sua ocorrência culmina no surgimento de outros danos, além do fato de apresentarem sintomas a longo prazo e serem, portanto, difíceis de monitorar de forma contínua, os custos estimados citados acima e por diversos outros estudos, mesmo que por vezes controversos, deixam claro que as consequências da CCMI têm um impacto significativo nos custos do ciclo de vida das infraestruturas que não podem ser negligenciados pela comunidade da construção civil (SANCHEZ e ROSOWSKY, 2008).

Desta forma, em razão dos enormes prejuízos da corrosão microbiologicamente induzida (CMI) para as estruturas de saneamento, para a população e para o meio ambiente, muitos estudos foram realizados ao redor do mundo, desde o início do século XX, no intuito de possibilitar uma melhor compreensão dos mecanismos deste processo nestes ambientes agressivos, suas causas e consequências, de forma a conseguir desenvolver e sugerir medidas e sistemas capazes de controlar seus efeitos deletérios aos materiais de construção.

No Brasil a CMI já foi amplamente abordada por diversos grupos de estudo, sendo, porém, a maior parte das pesquisas focada em materiais metálicos e na ocorrência desta corrosão em sistemas de petróleo e gás. Algumas pesquisas foram desenvolvidas também sobre biodeterioração causada por fungos em prédios históricos. Observou-se, assim, uma lacuna nas pesquisas nacionais sobre a CMI do concreto especialmente em estruturas de saneamento, onde este fenômeno se mostra mais frequente, de forma a contribuir para o entendimento da CCMI pela comunidade científica brasileira.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa está relacionada à deterioração do concreto provocada por microrganismos em ambientes agressivos contendo esgoto. Os principais objetivos deste trabalho propõem fornecer uma ampla revisão dos principais conceitos da biodeterioração e da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) em estruturas de saneamento, analisar a evolução dos trabalhos científicos existentes sobre o tema e discutir, de forma sistematizada, os principais métodos de prevenção existentes contra este problema.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Esta pesquisa tem como objetivos específicos:

- Avaliar mecanismos da biodeterioração e da CCMI por referenciais teóricos;
- Elaborar linha do tempo com as principais pesquisas sobre o tema;
- Realizar estudo de caso por levantamento fotográfico de fossas sépticas do campus de Goiabeiras da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES);
- Realizar estudo de caso por meio de levantamento fotográfico de estruturas de concreto deterioradas em duas estações de tratamento de efluentes (ETE), uma na Companhia Espiritosantense de Saneamento (CESAN) e outra da concessionária Serra Ambiental.
- Sistematizar as técnicas mais utilizadas para controle da CCMI em estruturas de saneamento.

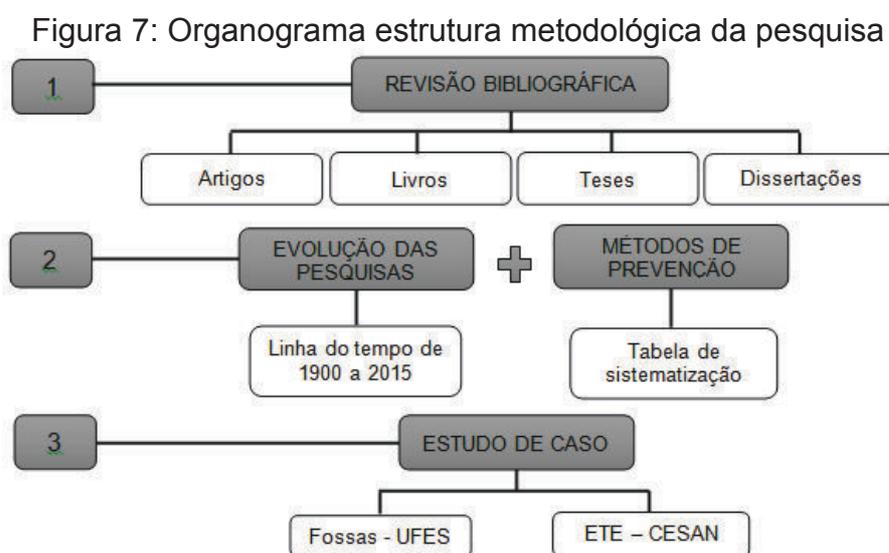
## 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Com o objetivo de expor de maneira clara e ordenada todos os passos deste estudo, a dissertação está estruturada em oito capítulos. No Capítulo 1 é apresentada uma introdução sobre o assunto, a justificativa do tema, os objetivos a serem alcançados, a estrutura da pesquisa e a estrutura metodológica utilizada. O Capítulo 2 é dedicado a uma revisão bibliográfica sobre a estrutura interna do concreto,

compostos do cimento, aspectos de durabilidade e manifestações patológicas. No Capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica específica sobre os principais tópicos abordados neste estudo, focando nos aspectos gerais da biodeterioração e de forma detalhada nos mecanismos da CCMI. O Capítulo 4 trás um estado da arte das pesquisas sobre a CCMI no mundo, com uma linha do tempo com os principais estudos desenvolvidos e os principais métodos de controle utilizados. No Capítulo 5 são apresentados os estudos de caso realizados. O Capítulo 6 apresenta as conclusões e, por fim, nos Capítulos 7 e 8 são apresentadas as referências bibliográficas e a bibliografia consultada para a composição dessa pesquisa.

#### 1.4 ESTRUTURA METODOLÓGICA

O presente trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica, onde foram estudados 120 artigos científicos, 13 livros, 16 teses de doutorado e 7 dissertações sobre o tema. Esta revisão permitiu que fosse realizado um estado da arte sobre o assunto, uma linha do tempo destacando os principais autores e pesquisas desenvolvidas na área e em seguida uma tabela sistematizando as técnicas atuais de prevenção e controle da CCMI em estruturas de saneamento. Por fim foram realizados estudos de caso para identificar no campo a ocorrência da CCMI em dois locais distintos e em diferentes estruturas que compõem os sistemas de saneamento. Na Figura 7 é mostrado um organograma com a estrutura metodológica utilizada na pesquisa.



Fonte: A autora

# CAPITULO 2

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada primeiramente uma revisão bibliográfica dos conhecimentos básicos sobre a microestrutura do concreto, durabilidade, principais agentes agressivos, visão geral sobre o esgoto, as atividades metabólicas das bactérias e interação com o concreto, os mecanismos de biodeterioração e da CCMI por fim serão abordadas as medidas corretivas e preventivas.

### 2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

O concreto é um material heterogêneo composto basicamente por cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água, podendo conter adições minerais e aditivos químicos em alguns casos. A nível macroscópico, o concreto é considerado um material bifásico, contendo partículas de agregado dispersas em uma pasta de cimento (matriz). Quando analisado microscopicamente, o concreto apresenta grande complexidade, sendo melhor compreendido quando a interface entre a pasta de cimento e o agregado é considerada com uma terceira fase, chamada zona de transição. O domínio sobre a microestrutura e as propriedades individuais dos componentes do concreto é fundamental para que se compreendam suas propriedades como resistência, durabilidade, módulo de deformação, porosidade, dentre outras (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

#### 2.1.1 Fases constituintes

- Pasta endurecida (matriz)

A matriz consiste na pasta de cimento (mistura de água e cimento Portland) que envolve os grãos de agregados miúdos e graúdos, composta por diferentes tipos de compostos hidratados do cimento, sendo os mais importantes:

- Silicatos hidratados (C-S-H)

São estruturas pequenas e fibrilares que constituem de 50 a 60% do volume dos sólidos da pasta, com morfologia variando de fibras pouco cristalinas até redes reticulares. A excelente resistência mecânica e química da pasta é atribuída

principalmente a existência desses compostos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

- Hidróxido de Cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ );

Os grandes cristais de hidróxido de cálcio, também conhecido como portlandita, constituem de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta, tendendo a formar cristais grandes sob a forma de prismas hexagonais, cuja morfologia depende da disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas do sistema (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

- Sulfoaluminatos de cálcio (AFt e AFm):

Ocupa de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta. Durante os primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina favorece a formação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, etringita ( $\text{C}_6\text{A}\cdot\text{S}_3\text{H}_{32}$ ), na forma de cristais prismáticos aciculares (formato de agulha), devido à reação de  $\text{C}_3\text{A}$  com o sulfato de cálcio e a água de hidratação da pasta. Em seguida se transformará em monosulfoaluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_4\text{A}\cdot\text{SH}_{18}$ ), o que torna o concreto suscetível ao ataque de sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

- Fase agregado

A fase agregado ocupa de 60 a 80% do volume total do concreto, sendo a principal responsável pelas seguintes propriedades: massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Tais propriedades são consequências diretas da resistência e da densidade do agregado. Suas características físicas (forma, textura, volume, tamanho e distribuição de poros) podem ser consideradas mais importantes do que a composição química ou mineralógica, quando não há identificação de substâncias ou elementos reativos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

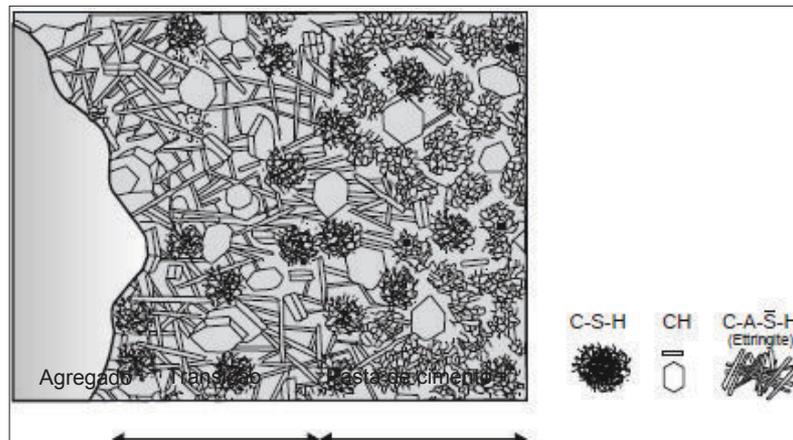
O agregado tem influência não apenas na resistência, mas também na durabilidade e no desempenho estrutural do concreto. Deve-se considerar o agregado como um material não inerte e cujas propriedades físicas, térmicas e químicas apresentam influência no desempenho final do concreto (NEVILLE, 2013).

- Zona de Transição

Segundo Mehta e Monteiro (2008), é a região de interface entre as partículas de agregado graúdo e a pasta de cimento, com uma camada de 10 a 50  $\mu\text{m}$  de espessura, sendo a área de maior porosidade e heterogeneidade. Esta porosidade se deve à elevação da relação a/c na mistura em função do filme de água que se forma em volta do agregado durante a exsudação e sedimentação do concreto.

A Figura 8 mostra as fases pasta de cimento, agregado e zona de transição, assim como os compostos hidratados do cimento.

Figura 8: Representação esquemática das zonas de hidratação do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

### 2.1.2 Reações de hidratação do cimento Portland

O processo de produção do cimento se dá em altas temperaturas, através da moagem do clínquer (mistura de minerais) com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), resultando na formação de compostos silicatos e aluminatos (BAUER, 2000). Tais combinações químicas, principalmente no estado sólido, conduzem, portanto, à formação dos seguintes compostos:

- Silicato tricálcico ( $3\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$ );
- Silicato dicálcico ( $2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$ );
- Aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$ );
- Ferro aluminato tetracálcico ( $4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$ ).

O Quadro 1 detalha as principais propriedades destes compostos silicatos e aluminatos formados na produção do cimento Portland, segundo Costa (2004).

Quadro 1 - Propriedades dos principais componentes do cimento Portland

COMPONENTE	NOME	PROPRIEDADES
C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forma de pequenos grãos equidimensionais e incolores</li> <li>2. Principal responsável pela resistência a curto prazo, principalmente ao fim do primeiro mês de cura.</li> <li>3. Segundo componente mais importante na produção do calor de hidratação.</li> <li>4. Segundo componente responsável pelo tempo de pega</li> <li>5. Sua forma impura é também conhecida como Alita.</li> <li>6. Sua velocidade de hidratação é controlada pela velocidade de difusão dos íons por camadas sobrejacentes do produto hidratado.</li> </ol>
C <sub>2</sub> S	Silicato Dicálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresenta-se sob 3 formas diferentes: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Em temperaturas elevadas - <math>\alpha</math>-C<sub>2</sub>S</li> <li>- Em temperaturas por volta de 1450°C - <math>\beta</math>-C<sub>2</sub>S</li> <li>- Em temperaturas por volta de 670°C - <math>\gamma</math>-C<sub>2</sub>S</li> </ul> </li> <li>* A forma <math>\beta</math>-C<sub>2</sub>S que está presente nos cimentos comerciais e sua forma é a de grãos arredondados e geminados.</li> <li>2. Principal responsável pela resistência a longo prazo, principalmente ao fim de um ano ou mais.</li> <li>3. Sua forma impura é também conhecida como Belita.</li> <li>4. Sua hidratação é controlada pela sua baixa velocidade intrínseca de reação.</li> <li>5. O produto da hidratação do C<sub>2</sub>S tem uma cal/sílica = 1,65.</li> </ol>
C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Forma partículas cristalinas retangulares.</li> <li>2. Principal na produção do calor de hidratação.</li> <li>3. Principal componente pela rapidez da pega, quando presente na forma cristalina.</li> <li>4. Sua forma predominante é a de placas achatadas.</li> <li>5. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.</li> </ol>
C <sub>4</sub> AF	Ferro Aluminato Tetracálcico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Apresenta-se sob a forma de solução sólida.</li> <li>2. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.</li> </ol>

Fonte: COSTA (2004)

## 2.2 DURABILIDADE

Um dos problemas relativos à durabilidade das estruturas de concreto diz respeito ao aumento da esbelteza dos elementos estruturais, propiciado pela maior resistência dos materiais, o que os tornou mais vulneráveis às influências do ambiente. Outro parâmetro refere-se aos critérios de aceitação baseados apenas na resistência do concreto, sem levar em conta sua permeabilidade e capacidade de absorção, propriedades condicionadas pela porosidade do material (BRANDÃO, 1998).

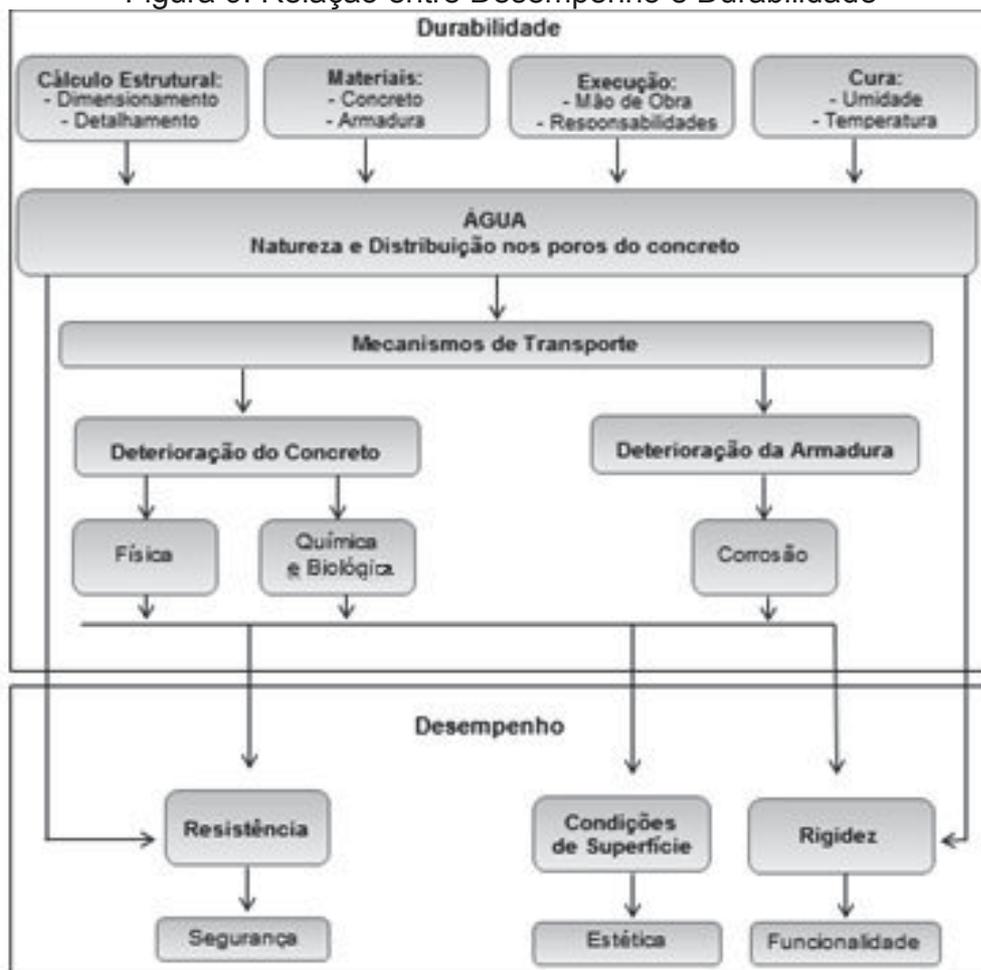
De acordo com as diretrizes da ABNT NBR 6118:2014, as estruturas de concreto

devem ser projetadas e construídas de modo a conservar sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.

Segundo Souza e Ripper (1998) durabilidade está ligada à capacidade do concreto de desempenhar de forma satisfatória as funções para qual foi projetado, considerando a exposição ao meio ambiente a que está submetido, por um período de vida previsto, sem a necessidade de elevados custos de manutenção e reparo.

Define-se como desempenho o comportamento em serviço de cada produto, ao longo da sua vida útil (SOUZA e RIPPER, 1998). O desempenho da estrutura deve obedecer aos requisitos para o qual foi projetado sob o ponto de vista de segurança, de funcionalidade e da estética. A Figura 9 relaciona durabilidade a desempenho.

Figura 9: Relação entre Desempenho e Durabilidade



Fonte: CEB (1992) apud Souza e Ripper (1998), pg 20.

A evolução dos estudos sobre durabilidade das estruturas de concreto armado e pretendido ocorreu devido a um maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e de gases agressivos nos meios porosos, como o concreto, que possibilitaram associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos. Assim, passou a ser possível estabelecer a avaliação da vida útil expressa em anos (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Vários documentos nacionais e internacionais produzidos nos últimos 20 anos contribuíram para introduzir e consolidar novos conceitos em defesa da durabilidade e do aumento da vida útil das estruturas de concreto, em função da degradação prematura das estruturas de concreto.

Embora considerando que o concreto, sendo adequadamente dosado, lançado, curado e com as manutenções devidamente efetuadas, possua uma longa vida útil na maioria dos ambientes naturais ou industriais, falhas prematuras nestas estruturas ainda podem ocorrer, proporcionando, assim, lições valiosas para o controle dos fatores responsáveis pela perda de durabilidade.

### **2.2.1 Manifestações Patológicas**

As manifestações patológicas são as falhas que ocorrem durante a realização de uma ou mais atividades referentes ao processo da construção civil: concepção (projeto), execução (construção) e/ou utilização (manutenção), excetuando os casos de catástrofes naturais de caráter imprevisível (SOUZA e RIPPER, 1998).

Neste contexto, são inúmeras as causas das manifestações patológicas em estruturas de concreto, tais como: sobrecargas, impactos, abrasão, movimentação térmica, retração hidráulica e térmica, alta relação a/c, exposição a ambientes agressivos, ataques biológicos, ação da água, excesso de vibração, falhas de concretagem e falta de proteção superficial (MEDEIROS, 2008).

A maior parte das manifestações patológicas no concreto tem origem físico-química (reações químicas), que se revelam, na maioria das vezes, ao nível microscópico pelo surgimento de microfissuras ou aumento da porosidade do material, reduzindo assim

suas propriedades mecânicas. Na maioria dos casos, estas manifestações ocorrem devido a penetração de agentes agressivos no concreto (HAJJ CHEHADE, 2010). Desta forma, é importante a análise do grau de agressividade do ambiente onde a estrutura será construída antes da mesma ser projetada.

### 2.2.2 Grau de agressividade

As obras de concreto armado ou protendido são muitas vezes executadas em ambientes expostos a agentes agressivos, necessitando, portanto, de cuidados especiais em suas fases de projeto, construção e operação para que atendam às expectativas de desempenho e durabilidade. A análise do ambiente em que a estrutura estará influi diretamente nas especificações do concreto e proteções para alcançar a durabilidade pretendida (CORSINI, 2013). Para o autor quanto mais forte a agressividade do meio, mais rápido e mais intenso pode ser esse processo.

Deste modo, a norma ABNT NBR 6118:2014 estabelece quatro classes de agressividade ambiental, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Classes de agressividade ambiental às estruturas de concreto

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 <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>(1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>	
IV	Muito Forte	Industrial <sup>(1)</sup> <sup>(3)</sup>	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 em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor  $\leq$  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 papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6.118:2014 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento

A ABNT NBR 6118:2014 mostra ainda que a durabilidade de uma estrutura depende das características do concreto, sua qualidade e espessura do cobrimento. Desta forma a norma prevê valores mínimos de relação a/c, classe do concreto e cobrimento nominal, em relação à classe de agressividade previamente estabelecida na tabela 2. Estes valores estão representados nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

CONCRETO	TIPO	CLASSE DE AGRESSIVIDADE			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classes de concreto	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

NOTAS

- 1) O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir ABNT NBR 12655.
- 2) CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
- 3) CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6.118:2014 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento.

Tabela 2: Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal

TIPO DE ESTRUTURA	ELEMENTO	CLASSE DE AGRESSIVIDADE			
		I	II	III	IV <sup>3</sup>
		Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje <sup>2</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido <sup>1</sup>	Todos	30	35	45	55

NOTAS

- 1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.
- 2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7 4 7 5, respeitando um cobrimento nominal ≥ 15 mm.
- 3) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6.118:2014 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento

Os ambientes são, portanto, classificados em função do grau de agressividade de auxiliando o projetista no correto dimensionamento, com recomendações a cerca do cobrimento, do traço, da relação a/c e outras características (MEDEIROS, 2008).

Em função deste grau de agressividade, faz-se necessário lançar mão de métodos capazes de prevenir e minimizar as possíveis manifestações atuantes na estrutura. Medeiros *et al.* (2011) destacam que a durabilidade das estruturas dependem essencialmente da espessura do cobrimento do concreto e da qualidade do mesmo, o que são influenciadas pela relação a/c e tipo de cimento usado.

### **2.2.3 Porosidade e Permeabilidade**

Para Souza e Ripper (1998), três fatores principais influenciam na durabilidade das estruturas de concreto: a porosidade, relacionada também ao mecanismo de transporte dos agentes pelos poros, as fissuras e a presença de água.

O concreto é um material necessariamente poroso, pois não é possível preencher a totalidade dos vazios do agregado com a pasta de cimento (MIRANDA, 2006). Os vazios presentes no material têm origens diversas: excesso de água de mistura (necessária para a trabalhabilidade); diminuição de volume que acompanha a hidratação do cimento; ar incorporado durante a mistura, erro na dosagem dos insumos, dentre outras. Como esses vazios são geralmente interligados, o concreto é normalmente permeável aos líquidos e gases (BAUER, 2000).

Um concreto cujos poros estejam interligados ou com fissuras que facilitem a entrada de elementos degradantes acaba por desproteger significativamente a estrutura. O transporte de gases, líquidos e substâncias dissolvidas, dentro do corpo da estrutura de concreto é realizado através dos processos de difusão, sucção capilar e penetração por pressão hidráulica (FERREIRA, 2009).

Neville (2013) faz distinção entre os conceitos de porosidade e permeabilidade, sendo porosidade a medida da proporção do volume total de concreto ocupada por poros, expressa geralmente em porcentagem. Estes poros podem ou não estar interligados, de modo que se estiverem, a permeabilidade será alta, e se não

estiverem interligados, a permeabilidade será baixa, mesmo se a porosidade for alta. O autor aponta os três principais fluidos de transporte no concreto: água pura ou com íons agressivos, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ).

Segundo Medeiros (2008), os principais mecanismos de transporte de massa pelo concreto são: permeabilidade, difusão e absorção por sucção capilar, sendo que estes podem ocorrer separadamente ou em conjunto. Permeabilidade (ou escoamento) se refere ao movimento sob diferencial de pressão, enquanto a difusão desloca o fluido por diferença de concentração do íon (da região de maior concentração para a região de menor concentração).

O processo de absorção por sucção capilar é decorrente do movimento capilar nos poros abertos ao meio ambiente, de modo que somente ocorre sucção capilar em concretos parcialmente secos (não ocorre adsorção em concretos completamente secos ou completamente saturados) (NEVILLE, 2013).

Em concretos situados em ambiente úmido, o transporte de gases, água e substâncias dissolvidas em água se dão através de difusão, em função da umidade relativa do ar. Os poros maiores da massa endurecida de concreto encontram-se parcialmente preenchidos pelo ar, a superfície desses poros é revestida por uma película de água aderida por adsorção. Neste ambiente, a difusão é o principal mecanismo de transporte, induzida por uma tendência ao equilíbrio quando há diferenciais de concentração de determinada substância (MIRANDA, 2006).

Mehta (1992) apud Khatri *et al.* (1997) afirma que a permeabilidade é a chave da durabilidade do concreto em diversos meios agressivos, sendo o seu controle mais importante que o controle químico do material. Sendo assim, é importante a utilização de concretos ditos impermeáveis e que proporcione maior estanqueidade às estruturas, haja vista serem vários os fatores que influenciam a sua permeabilidade: o meio ambiente, a composição do concreto, o tipo de cimento, o tipo de forma utilizada, o nível da energia de adensamento mecânico, as condições de cura, a solicitação imposta às estruturas (estáticas e dinâmicas), etc.

## 2.3 DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

O concreto está sujeito a sofrer os mais diversos tipos de ações deletérias ao longo do tempo, podendo ser causadas por fatores intrínsecos ou extrínsecos. A Figura 10 apresenta como exemplo algumas manifestações patológicas em estruturas de concreto, causadas por diferentes formas de deterioração.

Figura 10: Exemplos de deterioração de materiais ao longo do tempo



Fonte: Aguiar (2006).

Vale ressaltar a diferença entre deterioração e degradação. Degradação se refere às transformações desejáveis dos materiais, como por exemplo, a degradação do plástico ou de resíduos. Por outro lado, a deterioração são as transformações deletérias que ocorrem no material ao longo de sua vida (SHIRAKAWA, 1994).

A forma com que a deterioração irá ocorrer, ou como os agentes agressivos vão agir sobre os materiais de construção e as diversas manifestações patológicas que os mesmos irão causar dependem de uma combinação de fatores ligados as etapas de concepção, construção, utilização e do grau de agressividade do meio ambiente onde a estrutura se encontra.

### 2.3.1 Mecanismos de deterioração

São inúmeros os mecanismos ou agentes de deterioração do concreto, responsáveis pelo envelhecimento e perda de durabilidade do material. Em princípio a deterioração do concreto pode ocorrer no agregado, na matriz de cimento ou em ambos, porém na prática a pasta sofre mais e de forma mais severa a deterioração em relação ao agregado (BRANDÃO, 1998).

Como exemplo de mecanismos de deterioração pode-se citar os ataques químicos por ácidos, cloretos, sulfatos ou nitratos, ou o fenômeno da carbonatação. (PINHEIRO, 2003). Além dos processos químicos de deterioração, o concreto também pode se deteriorar devido a fatores físicos ou mecânicos (BRANDÃO, 1998), ou ainda por fatores ligados aos processos biológicos. Portanto, além de estudar os mecanismos, é importante tentar identificar as suas causas.

Sabe-se que a perda de durabilidade do concreto está ligada a processos de deterioração de natureza complexa, podendo estar ligada a fatores internos ou externos ao material, podendo, ainda, estas causas terem uma ação conjunta na deterioração do concreto. Para Biczok (1972) os fatores externos consistem na presença de substâncias agressivas no meio, umidade, temperatura, gelo e degelo, condições favoráveis para o surgimento de microrganismos, dentre outros. Já os fatores internos são intrínsecos ao próprio material como: sua composição mineralógica, porosidade, idade, dentre outros.

Na prática, o concreto em estágios avançados de degradação, está submetido à ação de mais de um fenômeno deletério, não havendo uma causa única neste processo. Geralmente, as causas físicas e químicas da deterioração estão ligadas e reforçam-se mutuamente, de forma que a separação entre causa e efeito torna-se complexo.

Neville (2013) divide as causas físicas e mecânicas. Para o autor, situações de impacto, abrasão, erosão ou cavitação agindo sobre o material seriam classificadas como causas mecânicas. Já as causas físicas compreendem os efeitos da umidade, temperatura, gelo e degelo, dentre outros.

Além das causas físicas e químicas, existem ainda as causas biológicas de deterioração do concreto, conhecida como biodeterioração. Este tópico será apresentado mais adiante.

### **2.3.2 Processos Mecânicos de Deterioração**

Quando o concreto sofre transformações deletérias causadas pela presença de

sobrecargas, vibrações ou erosões têm-se um processo mecânico de deterioração. Tais fatores podem causar manifestações patológicas como fissuração excessiva, danos por tração, cisalhamento ou flexão, desgastes superficial dentre outros. Por sua vez, tais manifestações podem ser uma porta de entrada para outros agentes de deterioração se instalarem (BRANDÃO, 1998).

### **2.3.3 Processos Físicos de Deterioração**

Como citado por Neville (2013) as causas físicas de deterioração do concreto compreendem os efeitos da umidade, temperatura, gelo e degelo, dentre outros.

Brandão (1998) cita ainda a cristalização de sais nos poros do concreto como uma causa física de deterioração. Quando o material apresenta alta permeabilidade, as águas salinas, por exemplo, percolam pelos poros, evaporam quando em contato com o ar e deixam os sais no concreto. Além de comprometer a aparência do concreto, estes sais irão cristalizar e contribuir para um aumento de volume, podendo causar fissuras.

### **2.3.4 Processos Químicos de Deterioração**

Alguns agentes agressivos podem penetrar no interior do concreto e provocar reações químicas deletérias ao material, dependendo das condições de umidade e temperatura do meio.

Segundo Brandão (1998), existe uma diferença fundamental entre o ataque por ácidos e o ataque por sulfatos. No ataque ácido, todo o sistema de poros é destruído, devido à reação dos ácidos com todos os componentes do cimento. Já os sulfatos atacam apenas certos componentes, sendo a permeabilidade do concreto de importância primordial na diminuição dos efeitos deletérios. Estes dois tipos de ataques químicos serão descritos a seguir.

#### **2.3.4.1 Ataque por Sulfatos**

Conforme Skalny *et al.* (2002), o ataque por sulfatos encontra-se entre os principais problemas de durabilidade das estruturas de concreto. A fonte para os sulfatos

envolvidos nas reações químicas com o concreto pode ser externa ou interna. No ataque externo, os sulfatos podem ser provenientes de água subterrânea ou de sulfatos de lixiviação a partir do solo adjacente, dos solos (argilas), esgotos e também da água do mar. No caso de ataque interno, podem ser provenientes de minerais nos agregados (agregados sulfatados), sulfatos dissolvidos na mistura de água, adições e aditivos, e, possivelmente, de sulfatos no cimento Portland.

Ao ser atacado por sulfatos o concreto adquire externamente uma coloração esbranquiçada, em um primeiro momento, podendo em seguida, com a formação de compostos expansivos em seu interior, apresentar fissuração ou deslocamento, com conseqüente perda de resistência à compressão (COSTA, 2004). Para o autor, os fatores que influenciam o ataque por sulfato são:

- Quantidade e natureza do sulfato presente;
- Nível da água e sua variação sazonal;
- Fluxo da água subterrânea e porosidade do solo;
- Forma da construção;
- A qualidade do concreto.

Além da ação externa (quando os sulfatos penetram o concreto por meio de seus poros ou fissuras), os sulfatos podem atacar a estrutura internamente, visto que eles podem ser encontrados na água de amassamento, nos agregados, nos aditivos do concreto, nas adições do cimento ou no próprio cimento (COSTA, 2004). A velocidade do ataque é multifatorial, podendo estar ligada a permeabilidade do concreto, o tipo de cimento utilizado, qualidade da água de cura e dosagem, taxa de sulfato presente, dentre outros (BRANDÃO, 1998).

Mehta e Monteiro (2008) destacam duas formas de danos: expansão (com conseqüente fissuração, facilitando a penetração de águas sulfatadas) e perda progressiva de resistência simultânea à perda de massa (devido à perda da coesão dos produtos de hidratação). Tais efeitos deletérios interferem na vida útil das estruturas, podendo inclusive ocasionar a completa ruptura das mesmas.

a) Meios de ataque por sulfato:

De acordo com Costa (2004) existem dois principais meios de ataque por sulfatos em materiais cimentícios. O primeiro é a reação com os produtos de hidratação do aluminato tricálcico não hidratado ( $C_3A$ ) produzindo etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ). O segundo é a reação com o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) produzindo gipsita ( $CaSO_4H_2O$ ). Costa (2004) simplifica as reações da seguinte forma:

- hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) + sulfato + água  $\rightarrow$  gipsita
- aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) + gipsita + água  $\rightarrow$  monossulfato
- monossulfato + gipsita + água  $\rightarrow$  etringita

b) Principais tipos de sulfato:

Dentre os sulfatos que atacam o concreto, destacam-se o Sulfato de Sódio ( $Na_2SO_4$ ), o Sulfato de Magnésio ( $MgSO_4$ ), Sulfato de Amônia ( $NH_4SO_4$ ), Sulfato de Potássio ( $K_2SO_4$ ) e o Sulfato de Cálcio ( $CaSO_4$ ). A intensidade do ataque depende do íon cátion (íon positivo) que está ligado ao radical sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) (COSTA, 2004). Para o autor a ordem crescente de agressividade é: sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ), sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ) e sulfato de amônia ( $NH_4SO_4$ ). Tais ataques serão descritos mais adiante.

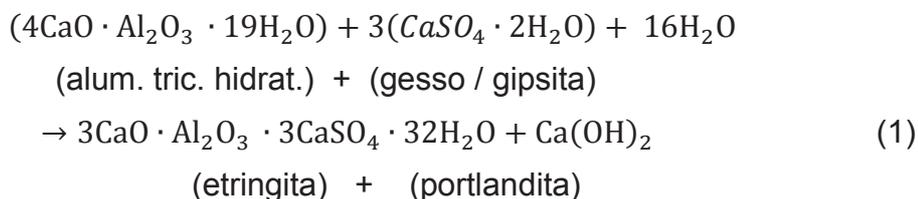
Souza e Ripper (1998) citam como os sulfatos mais perigosos para o concreto o sulfato de amônio [ $(NH_4)_2SO_4$ ], o sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), o sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ) e o sulfato de sódio ( $Na_2SO_4$ ).

- **Sulfato de Cálcio ( $CaSO_4$ )**

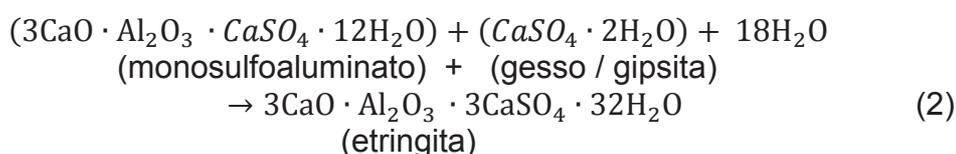
Segundo Costa (2004), o sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ) quando associado a duas moléculas de água é conhecido comercialmente como gesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ). Por apresentar baixa solubilidade na água se comparado aos sulfatos de magnésio ( $MgSO_4$ ) e de sódio ( $Na_2SO_4$ ), é considerado o tipo menos agressivo.

Quando a concentração de sulfato de cálcio atinge valores em torno de 2,0g/L de água, iniciam-se reações com o aluminato tricálcico hidratado formado durante a hidratação da pasta cimentícia, formando assim a etringita e portlandita.

- Reação  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  com aluminato tricálcico hidratado (COUTINHO, 2001), conforme Equação 1:



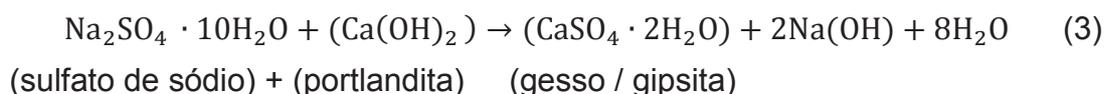
- Reação do  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  com o monosulfoaluminato de cálcio (COSTA, 2004), conforme Equação 2:



- **Sulfato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )**

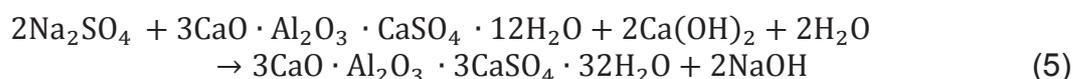
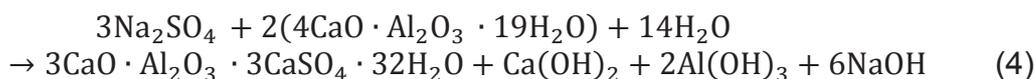
Segundo Costa (2004), os sulfatos de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) apresentam uma solubilidade cerca de vinte vezes maior do que os sulfatos de cálcio, e são, portanto, mais agressivos. Eles podem estar presentes em dois tipos de reações: uma com o hidróxido de cálcio (portlandita) ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e outra com as fases do aluminato de cálcio hidratado, apresentadas respectivamente nas Equações 3 a 5.

- Reação do  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (COUTINHO, 2001), conforme equação 3:



Na reação acima, há a formação de hidróxido de sódio. Este subproduto da reação assegura a continuidade da alcalinidade do sistema, essencial para a estabilidade da fase C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

- Reação do  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  com as fases de  $\text{C}_3\text{A}$  (COSTA, 2004), conforme equação 4 e 5:



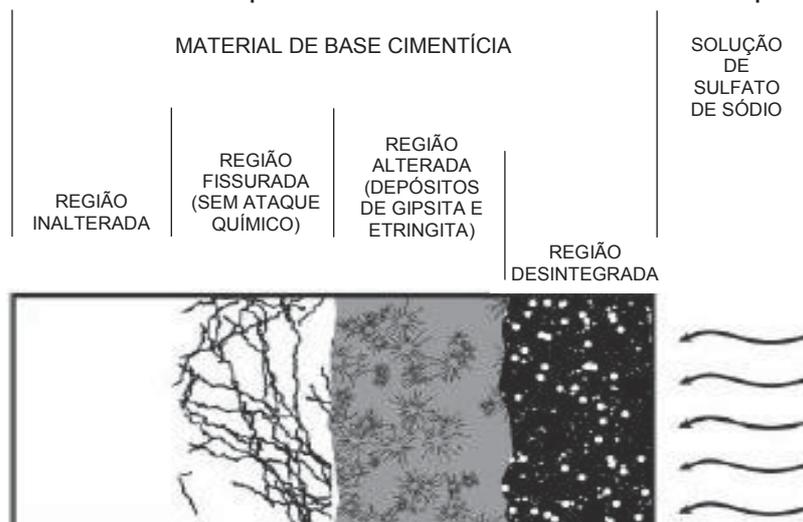
O ataque do sulfato em concentrações inferiores a  $1,0\text{g SO}_4^{2-}/\text{L}$  caracteriza-se pela

produção de etringita, com subsequente deterioração, após o ataque à fase do aluminato de cálcio hidratado. Em grandes concentrações, a reação é com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , produzindo gesso e causando aumento de volume (COSTA, 2004).

Souza (2006) descreve os cinco passos do ataque do sulfato de sódio:

- 1) A solução de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  invade o interior do material cimentício.
- 2) Nas regiões próximas da superfície, forma-se etringita e gipsita. Tais compostos expansivos não geram tensões internas, pois são formados nos vazios da pasta de cimento;
- 3) Ao preencherem os vazios, esgotando a capacidade de acomodação da estrutura da pasta de cimento, inicia-se a geração de tensões internas no material, devido a continuidade de formação de agentes expansivos, que são suportadas pela região inalterada da pasta de cimento.
- 4) A região inalterada quimicamente não suporta mais as tensões de tração geradas pelos compostos expansivos, e inicia um processo de fissuração.
- 5) A solução agressiva de sulfatos continua a adentrar o material pela área fissurada, reagindo com os compostos hidratados da pasta de cimento. Formam-se etringita e gipsita, que tendem a expandir mais. Por fim a seção do material fica dividida em: região desintegrada, região de depósito de produtos de ataque, região com fissuração e região sã, conforme a Figura 11.

Figura 11: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio



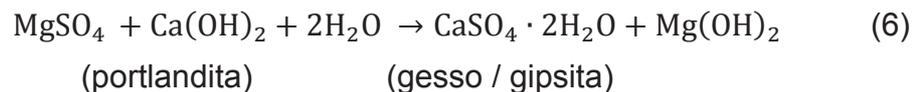
Fonte: Souza (2006)

- **Sulfato de Magnésio (MgSO<sub>4</sub>)**

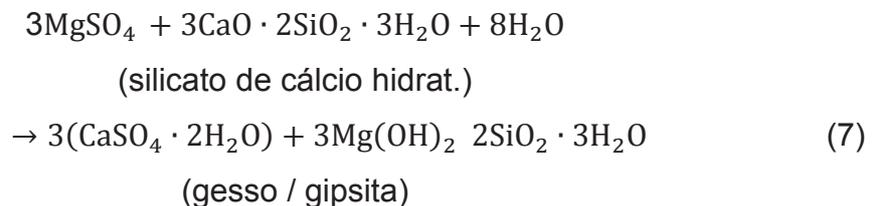
O ataque do MgSO<sub>4</sub> é um dos mais danosos ao concreto, devido a sua solubilidade ser duas vezes maior que o sulfato de sódio e trinta e cinco vezes maior que o sulfato de cálcio (COSTA, 2004). Além disto, o MgSO<sub>4</sub> reage quimicamente com a Ca(OH)<sub>2</sub> e com (C-S-H) desmembrando a fase do C-S-H em sílica, alumina e gesso.

A conversão de hidróxido de cálcio em gipsita é somada a formação de hidróxido de magnésio, que é insolúvel e diminui a alcalinidade do sistema. Desta forma, a estabilidade do C-S-H é reduzida e ele também é atacado pela solução de sulfato, tornando o ataque ainda mais severo (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

- Reação do MgSO<sub>4</sub> com Ca(OH)<sub>2</sub> (COSTA, 2004), conforme equação 6:



- Reação do MgSO<sub>4</sub> com (C-S-H) (COSTA, 2004), conforme equação 7:



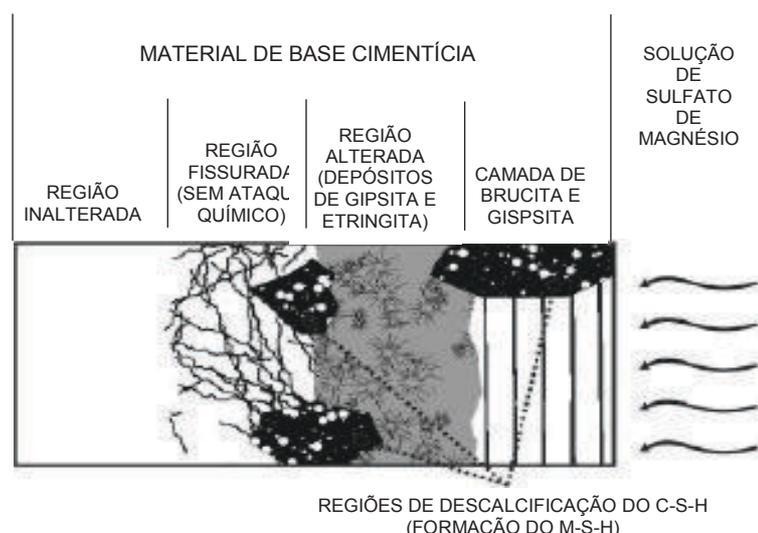
Segundo a ASTM 1012: 2004, o ataque em concentrações inferiores a 3,2g SO<sub>4</sub>/L ou 4,0g MgSO<sub>4</sub>/L caracteriza-se pela formação da etringita. Concentrações de sulfato entre 3,2g a 6,0g SO<sub>4</sub>/L ou 4,0g a 7,5g MgSO<sub>4</sub>/L caracterizam-se pela formação de etringita e gesso e a deterioração e fissuração podem ser lentas e de difícil percepção. Em concentrações acima de 6,0g SO<sub>4</sub>/L ou 7,5g MgSO<sub>4</sub>/L, há formação de hidróxido de magnésio (Mg(OH)<sub>2</sub>), gesso e gel de sílica e a deterioração do concreto é muito severa (COSTA, 2004).

Souza (2006) descreve os passos do ataque do MgSO<sub>4</sub>:

- 1) A solução agressiva de MgSO<sub>4</sub> penetra o interior do material;

- 2) Uma camada de  $Mg(OH)_2$  (brucita) forma-se rapidamente na superfície, a partir da reação da solução agressiva com  $Ca(OH)_2$  da pasta de cimento hidratada. Forma-se também gipsita;
- 3) A formação de  $Mg(OH)_2$  consome muita  $Ca(OH)_2$ , diminuindo o pH da pasta. Para manter o equilíbrio, o C-S-H libera  $Ca(OH)_2$ , aumentando novamente o pH, contribuindo para a descalcificação da estrutura;
- 4) Depois de formada a camada de  $Mg(OH)_2$ , a solução agressiva penetra no interior do material por difusão, porém esta é dificultada pela camada de  $Mg(OH)_2$ , que é um gel impermeável;
- 5) Forma-se gipsita e etringita nas regiões próximas à superfície (porém sob a camada de  $Mg(OH)_2$ ), causando expansão e tensões internas nas camadas inalteradas, o que gera fissuração nessa região (similar ao que acontece no ataque por sulfato de sódio);
- 6) 6: Em algumas regiões, a solução agressiva de sulfatos degrada diretamente o C-S-H (pela ação do cátion  $Mg^{2+}$ ), causando perda de resistência e desintegração da pasta. A seção do material divide-se nas regiões: camada de  $Mg(OH)_2$  e gipsita paralela à superfície, região de depósito de produtos de ataque, regiões isoladas de descalcificação do C-S-H (formando M-S-H); região com fissuração e região sã, como mostra a Figura 12.

Figura 12: Modelo de ataque em material de base cimentícia por  $MgSO_4$



Fonte: Souza (2006)

O concreto, além de sofrer decomposição química da pasta de cimento, também sofre fissuração e desagregação (devido à expansibilidade do gesso e da etringita), seguida de perda de massa. A perda de resistência mecânica ocorre não só pela perda de massa, mas principalmente devido à decomposição química do C-S-H (responsável pela resistência mecânica do concreto) (COSTA, 2004). Isso ocorre porque o C-S-H libera  $\text{Ca(OH)}_2$  para repor o que foi consumido na reação com o sulfato, a fim de manter o pH do concreto alcalino, ficando o C-S-H, assim, descalcificado da estrutura.

c) Consequências do ataque por sulfato:

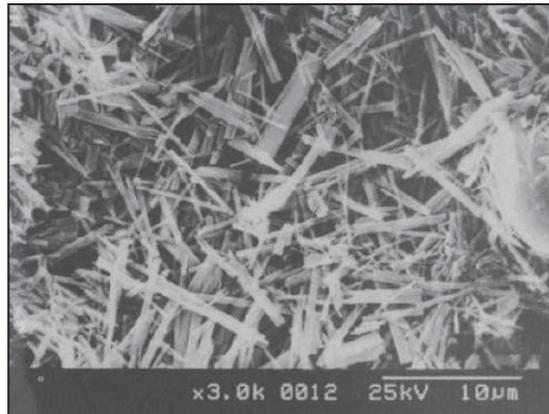
- **Formação de Etringita Secundária**

A etringita ( $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ), também conhecida como sulfoaluminato de cálcio é um mineral, naturalmente encontrada no cimento Portland. Fontes de sulfato de cálcio, tais como gesso, são intencionalmente adicionadas ao cimento para regular as reações de hidratação precoce, melhorar desenvolvimento da resistência e reduzir a retração por secagem. O gesso e outros compostos de sulfato reagem com aluminato de cálcio do cimento para formar a etringita nas primeiras horas após a mistura com água. A maior parte do sulfato presente no cimento é consumida neste processo e a etringita fica uniformemente dispersa em todo o concreto (PCA, 2011).

Na medida em que a estrutura sofre ataque de agentes agressivos, a formação da etringita secundária passa a ocorrer, gerando, dentre outras consequências, a expansão e fissuração do concreto. Quando analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) a etringita tem formato de finas agulhas, conforme Figura 13.

Há uma concordância na academia de que as expansões no concreto relacionadas ao sulfato sejam associadas à etringita. Entretanto, os mecanismos pelos quais sua formação origina expansão, causam ainda um pouco de controvérsia. O efeito da pressão causada pelo crescimento dos cristais da etringita e a expansão devida à adsorção de água em meio alcalino pela etringita pouco cristalina, são duas das várias hipóteses apoiadas pela maioria dos pesquisadores (COSTA, 2004).

Figura 13: Imagem da etringita em microscópio eletrônico de varredura (MEV)

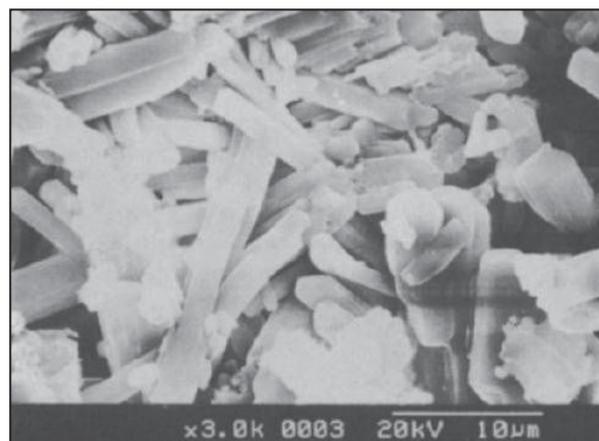


Fonte: Mori *et al.*, (1992)

- **Formação de Gipsita Secundária**

A formação de gipsita também é capaz de causar expansão. Foi observado que a degradação da pasta de cimento endurecida pela formação da gipsita passa por um processo que leva à redução de rigidez e resistência. Este é seguido por expansão, fissuração, e transformação final do material em uma massa pastosa ou não-coesiva. Dependendo do tipo de cátion presente na solução de sulfato (exemplo:  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ ), tanto o hidróxido de cálcio como o silicato de cálcio hidratado da pasta de cimento podem ser convertidos em gipsita pelo ataque do sulfato (ASSAAD, 2005). Na Figura 14 é possível observar a estrutura da gipsita quando vista no MEV.

Figura 14: Imagem da gipsita em microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Fonte: Mori *et al.*, (1992)

### 2.3.4.2 Ataque por ácidos

Existem vários tipos de ácidos nocivos ao concreto. Segundo Neville (2004) os ácidos envolvidos nos processos de deterioração do concreto podem ser de natureza orgânica ou inorgânica, como descrito no Quadro 3. Para o autor, os ácidos mais comuns e mais agressivos são os ácidos carbônico, sulfúrico e clorídrico.

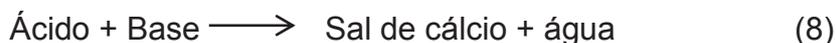
Quadro 3 - Ácidos envolvidos na deterioração do concreto

<b>Ácidos Orgânicos</b>	<b>Ácidos Inorgânicos</b>
Acético	Carbônico
Cítrico	Hidroclórico
Fórmico	Hidrofluórico
Lático	Fosfórico
Tânico	Sulfúrico

Fonte: Neville (2013)

A ação dos ácidos no concreto é pouco comum e a agressão só se manifesta, na prática, para pH inferior a 6,5. Se o concreto apresentar pH inferior a 3, não irá resistir, sendo necessária uma proteção maior. A deterioração do concreto por ácidos resulta, principalmente, de reações entre esses elementos e os compostos de cálcio do cimento endurecido - silicato, aluminato e hidróxido de cálcio -, os quais são convertidos a sais de cálcio. Na maioria dos casos, o resultado das reações químicas é a formação de compostos de cálcio solúveis em água, os quais podem ser facilmente lixiviados, resultando em perda da capacidade de ligação entre os constituintes do concreto (BICZOK, 1964).

Portanto, os ácidos reagem com o elemento de caráter básico da pasta de cimento ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), produzindo água e sais de cálcio, conforme Equação 8:



Em estruturas de saneamento encontra-se com bastante frequência o gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), resultante do metabolismo de sulfatos presentes no esgoto por bactérias anaeróbias. Trata-se de um gás fraco, que por si só é pouco nocivo ao concreto. Entretanto, quando se desprende do esgoto, é oxidado por bactérias aeróbias, presentes na superfície livre das estruturas, transformando-se em ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (BAUER, 2000), conforme Equação 9:



ataque de origem puramente química (HAJJ CHEHADE, 2010). Entretanto, a deterioração química observada nos materiais, é muitas vezes causada por ácidos resultantes da decomposição e metabolismos de organismos vivos.

Há ainda os processos mecânico de deterioração causado por agentes biológicos, quando a presença desses seres vivos provoca a saturação da superfície do concreto, devido à retenção de água no local, ou quando os mesmos penetram no concreto gerando fissuras (BRANDÃO, 1998).

Em estruturas de saneamento, principalmente, são inúmeros os problemas relacionados à deterioração microbiológica. Portanto, este processo será explicado no capítulo 3.

# CAPÍTULO 3

---

### **3 ASPECTOS ESPECÍFICOS SOBRE BIODETERIORAÇÃO E CCM**

#### **3.1 BIODETERIORAÇÃO**

Quando um material tem sua durabilidade reduzida devido a ação direta ou indireta de microrganismos, tem-se a chamada biodeterioração. Estes microrganismos produzem diversas interações entre os materiais e o meio externo, dando origem a um processo físico-químico de destruição (CWALINA, 2008).

No ataque direto, a biodeterioração resulta simplesmente da presença dos microrganismos sobre o material, podendo haver danos por formação de matéria biológica nos seus poros, o que gera fissuras. No caso do ataque indireto, os microrganismos irão produzir substâncias que reagirão com o material, causando a dissolução dos componentes ou formação de produtos expansivos. Os processos de biodeterioração provocam a perda de propriedades físicas e mecânicas e/ou alterações da composição dos materiais (HERISSON, 2012).

Do ponto de vista terminológico, é importante entender a diferença entre bioalteração e biodeterioração. Uma bioalteração é caracterizada por alterações de superfícies devido à ação de microrganismos. Tais alterações não são visíveis e não diminuem as propriedades do material (por exemplo, o desenvolvimento de algas fotossintéticas sobre uma superfície). Da mesma forma, não se deve confundir a biodeterioração com a biodegradação. A biodegradação é induzida por microrganismos tais como bactérias, fungos e microalgas e pode ser comparada a uma bioconversão ou biotransformação, sendo uma transformação desejável do material, como no caso da biodegradação dos resíduos (HERISSON, 2012).

Os termos biocorrosão ou corrosão microbiológica dizem respeito ao processo eletroquímico de dissolução metálica, originado ou acelerado pela atividade de microrganismos. Já a biodeterioração é uma mudança indesejável nas propriedades de um material, causada pela atividade vital de um organismo. É um termo com uso mais amplo do que biocorrosão, já que abrange, além dos materiais metálicos, os materiais não-metálicos, como rochas, madeiras, pinturas e outros (VIDELA, 2003).

Na literatura internacional é muito comum o emprego dos termos *Microbiologically Induced/Influenced Corrosion (MIC)*, *Microbiologically Induced/Influenced Concrete Corrosion (MICC)*, ou ainda *Biogenic acid corrosion of concrete*, em tradução livre: corrosão induzida/influenciada microbiologicamente, corrosão de concreto induzida/influenciada microbiologicamente ou corrosão do concreto por ácido biogênico, se referindo a um tipo de biodeterioração que ocorre nos materiais.

No Brasil pode-se verificar o uso predominante de dois termos, corrosão microbiologicamente induzida (CMI) ou corrosão induzida microbiologicamente (CIM). Em muitas pesquisas nacionais, o termo biocorrosão foi usado como sinônimo deste fenômeno, pelo fato da maioria das pesquisas nesta área terem sido realizadas sobre materiais metálicos.

### 3.1.1 Generalidades

Para que o fenômeno da biodeterioração ocorra, é necessária a existência de três parâmetros fundamentais, sem os quais não haveria o início do processo: organismos vivos, um material e um ambiente favorável, como mostra a Figura 15.

Figura 15: Parâmetros que levam à biodeterioração



Fonte: Adaptado de Herisson (2012)

#### a) Os organismos vivos

A biodeterioração pode ser causada por macrorganismos, como moluscos, crustáceos, insetos, dentre outros, ou ainda por microrganismos. O termo

microrganismo diz respeito aos seres vivos microscópicos, incluindo bactérias, fungos, algas, líquens, musgos ou vírus. Eles são os agentes da biodeterioração, tendo uma ação direta ou indireta sobre o material (HERISSON, 2012). Alguns exemplos destes organismos são mostrados na Figura 16.

Figura 16: Exemplos de organismos vivos que podem causar biodeterioração a) molusco b) algas e líquens c) fungos d) crustáceos



Fonte: Bastidas-Arteaga, (2008) *apud* Sanchez e Rosowsky (2008)

Geralmente os microrganismos mais nocivos aos materiais se desenvolvem na forma de um biofilme, o qual permite que eles criem um ambiente favorável em termos de umidade, nutrientes e associação com outros organismos, tornando-se assim, mais resistentes às situações adversas como os choques térmicos ou hidráulicos, a presença de inibidores de crescimento e antibióticos ou qualquer outro tratamento (HERISSON, 2012). A formação do biofilme será abordada no item 3.1.4.

Dentre os microrganismos atuantes no fenômeno da biodeterioração dos materiais de construção, nesta pesquisa será estudada a ação de bactérias. Dois tipos de bactérias estão envolvidos neste processo: as bactérias redutoras de sulfato (BRS – anaeróbias) e as bactérias oxidantes de enxofre (BOE – aeróbias).

b) O meio ambiente

A biodeterioração pode ser encontrada em vários ambientes, por exemplo, em poços

de extração ou plataformas de petróleo, em instalações portuárias marítimas e fluviais, em centrais de geração de energia ou indústria aeroespacial em edificações históricas, em sistemas de distribuição de água ou ainda em redes de esgotamento sanitário (EHRICH *et al.*, 1999).

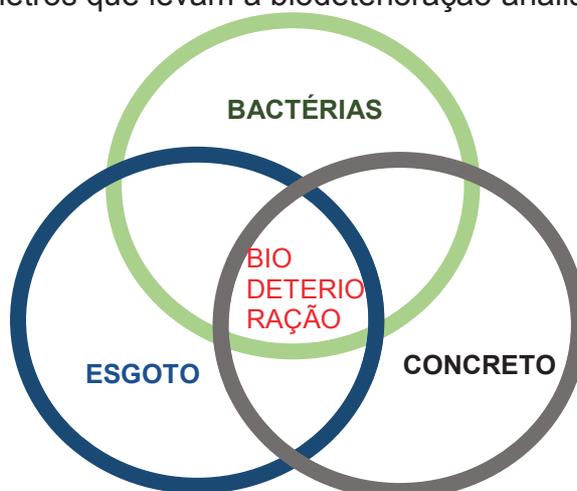
Para Herisson (2012), o meio ambiente pode ser considerado o vetor da biodeterioração, pois é ele que carrega os microrganismos e parte dos nutrientes necessários para o seu crescimento. Desta forma, em função das características do meio, a biodeterioração será mais ou menos agressiva. O meio ambiente estudado nesta pesquisa serão as estruturas de saneamento de esgoto.

### c) Os materiais

No que diz respeito aos materiais, a biodeterioração pode ocorrer em diversos tipos de materiais, seja metálico, mineral, polímero ou cerâmico, como dito por Videla (2003). A agressividade do ataque irá depender de características do material tais como sua composição química, sua porosidade, os tratamentos de superfície empregados e a bioreceptividade do material.

Neste trabalho o material estudado é o concreto. Assim, os parâmetros de biodeterioração analisados nesta pesquisa são a ação das bactérias em estruturas de saneamento de esgoto feitas em concreto, como ilustra a Figura 17.

Figura 17: Parâmetros que levam à biodeterioração analisados nesta pesquisa:



Fonte: Autora (2015)

### 3.1.2 Classificação

Segundo Allsopp e Seal (1986) e Gaylarde *et al.* (2002) a biodeterioração pode ser classificada nas três categorias a seguir e, dependendo da natureza dos materiais e das condições ambientais, tais processos podem ocorrer separadamente ou simultaneamente:

- Biofísica:

A deterioração biofísica (ou biomecânica) refere-se às ações que afetam diretamente os componentes dos materiais e as propriedades mecânicas, como o seu rompimento por pressão exercida pelos organismos. Isto muitas vezes está relacionado ao processo de crescimento, de locomoção ou movimento dos organismos, e não com uso do material como fonte de alimento.

Este tipo de dano é normalmente causado por organismos macroscópicos, como por exemplo, danos por crescimento de raízes, e ação de roedores ou insetos, não sendo relatado na literatura a participação de microrganismos neste processo.

- Bioquímica

A deterioração bioquímica pode ser dividida em: assimilatória e dissimilatória (ou não assimilatória). O processo assimilatório ocorre quando os organismos utilizam o próprio material como uma fonte de alimento, modificando assim as suas propriedades (por exemplo, degradação dos combustíveis e metais). No processo dissimilatório, os organismos vivos excretam os resíduos ou outras substâncias (por exemplo,  $H_2S$ ,  $FeS$ ) e estes resíduos irão reagir quimicamente com o material e causar sua deterioração.

- Estética

A deterioração estética é causada pela presença de organismos, seus corpos mortos, excrementos ou produtos metabólicos que formam uma camada microbiana na superfície do componente conhecido como biofilme. Este tipo é principalmente associado com a presença de microrganismos que causam aparência indesejável no

material. Mesmo que o desempenho dos materiais não seja afetado inicialmente, com o tempo a incrustação pode exceder os efeitos puramente estéticos e causar danos físicos ou químicos ao material.

### **3.1.3 Bioreceptividade**

Segundo Guillitte (1995), a bioreceptividade é a capacidade que o material possui de ser colonizado por um ou mais grupos de organismos vivos, de forma que suas propriedades intrínsecas farão com que ele seja deteriorado ou não.

Quando um material é colonizado pela primeira vez e suas propriedades permanecem intactas, tem-se a “bioreceptividade primária”. Na “bioreceptividade secundária”, as propriedades dos materiais sofrem uma alteração devido à colonização inicial por microrganismos, formando um novo tipo de colônia. Quando o substrato sofre uma intervenção externa, como tratamentos com biocida e/ou polimento, o material adquire outro potencial, chamado “bioreceptividade terciária” (GUILLITTE, 1995).

O potencial bioreceptivo de um material é fundamental para o desenvolvimento do mecanismo de biodeterioração, pois a suscetibilidade à colonização possibilitará a presença de microrganismos capazes de deteriorar o material.

Muitos fatores, como: a natureza química (tipo de composição mineral), física (porosidade e permeabilidade) e fatores ambientais (disponibilidade de água, pH, exposição às condições climáticas adversas, fontes de nutrientes) irão influenciar na bioreceptividade dos materiais de construção (WARSCHEID e BRAAMS, 2000).

A rugosidade superficial é responsável pela ancoragem dos microrganismos na superfície do material. Já a porosidade, principalmente a porosidade capilar, interfere na absorção e na retenção da água necessária para o metabolismo dos microrganismos, tornando-se, portanto, uma das principais propriedades do material a favorecer uma colonização (DUBOSC, 2000).

### 3.1.4 A formação do Biofilme

Na natureza, os microrganismos estão amplamente distribuídos e tendem a colonizar as superfícies sólidas, em condições favoráveis para o seu desenvolvimento, formando assim um biofilme. Segundo Fang *et al.* (2002), este biofilme forma uma camada protetora na superfície, reduzindo a sua suscetibilidade aos ataques externos. Por outro lado, pode resultar na corrosão e deterioração de alguns materiais.

Os biofilmes são ecossistemas microbianos de coloração variada e consistência gelatinosa, compostos por substâncias extracelulares (polissacarídeos e produtos ácidos) e microrganismos mortos, apresentando-se sob a forma de película. Nos biofilmes podem coexistir espécies de diferentes grupos microbianos como bactérias, fungos, algas e protozoários, sendo as bactérias os principais microrganismos envolvidos em sua formação (SHIRAKAWA, 1994).

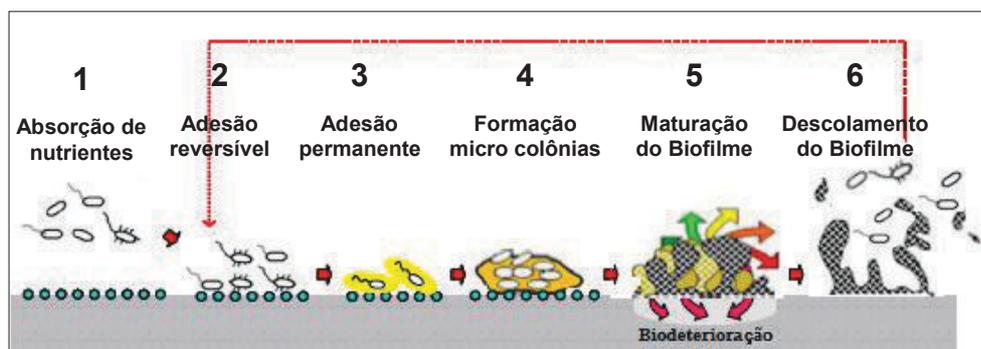
De acordo com Fang *et al.* (2002), eles permitem que as bactérias tenham mais resistência, uma vez que a heterogeneidade bacteriana destes ecossistemas garante uma cooperação metabólica e estrutural do meio. As bactérias excretam uma substância polimérica extracelular, ou exopolissacarídeos (EPS), de consistência gelatinosa, caracterizada pela sua capacidade aderente, permitindo que outras bactérias se liguem ao biofilme ou capturem as substâncias nutritivas presentes no ambiente.

Segundo Hondjuila Miokono (2013), a formação do biofilme (por bactérias) acontece em 6 etapas, como descrito abaixo e ilustrado na Figura 18.

1. Absorção de nutrientes orgânicos ou inorgânicos: os nutrientes como proteínas, sulfatos, nitratos, matéria orgânica, dentre outros, se depositam na superfície e diminuem o pH da superfície. No caso de canalização de esgoto de concreto, este fenômeno corresponde à absorção de compostos de enxofre, à lixiviação e à carbonatação da parte emersa do cano;
2. Adesão reversível: nesta fase ocorre a deposição de microrganismos na superfície, por meio de ligações químicas fracas ou não covalentes;

3. Adesão permanente ou ancoragem: onde ocorre a fixação dos microrganismos pela síntese de moléculas de proteínas (chamadas ligantes) e utilização de estruturas de ancoragem. Neste estágio as estruturas do biofilme já são evidentes;
4. Formação de micro colônias: neste estágio ocorre a divisão dos microrganismos levando à formação de micro colônias que formam o biofilme. Quando a densidade de células é grande, começa a ocorrer a síntese dos exopolissacarídeos (EPS);
5. Maturação do biofilme: nesta fase, com o aumento da síntese de EPS, a espessura do biofilme aumenta, assim como a sua aderência à superfície. Ocorre também o chamado metabolismo cooperativo, onde outros microrganismos se integram ao biofilme e se desenvolvem utilizando os excrementos dos microrganismos já existentes. Neste ponto o biofilme é composto de 75 a 95% de EPS e de 5 a 25% de microrganismos. No caso de tubulações de esgoto, é nessa fase que ocorre a produção de  $H_2S$  pelas BRS e de  $H_2SO_4$  pelas BOE. Portanto é nesta fase que a CCMI é mais acentuada;
6. Descolamento: nesta etapa ocorre o envelhecimento do biofilme. Fragmentos carregados de microrganismos se descolam e colonizam outras superfícies, completando, assim, o ciclo.

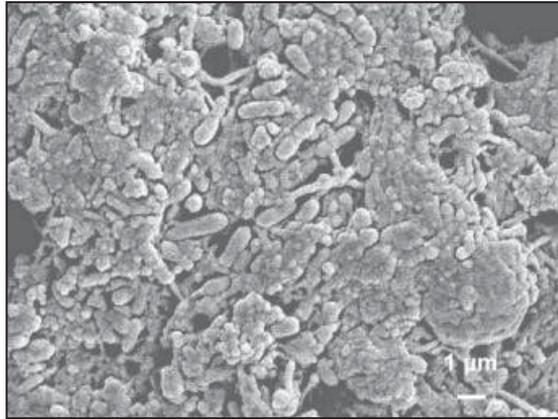
Figura 18: Formação do biofilme bacteriano



Fonte: Adaptado de Hondjuila Miokono (2013)

A Figura 19 mostra uma imagem do MEV de um biofilme, possivelmente de bactérias do gênero *Thiobacillus* em uma superfície de concreto (VINCKE *et al.*, 2002).

Figura 19: Formação de biofilme em estrutura de concreto pelo MEV



Fonte: Vincke *et al.* (2002)

### 3.1.5 Bactérias envolvidas

#### 3.1.5.1 As bactérias redutoras de sulfato (BRS)

O nome bactéria redutora de sulfato (BRS) se refere a microrganismos que conduzem a redução dissimilatória do sulfato, onde o íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) atua como um agente oxidante para a dissimilação da matéria orgânica. Estas bactérias são as únicas capazes de utilizar os compostos de enxofre (sulfato principalmente) como aceitor final de elétrons em sua respiração, tendo como produtos principais o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (GOTTSCHALK, 1986).

As BRS são bactérias heterótrofas (ou seja, não produzem o próprio alimento), anaeróbios estritos (não usam o oxigênio para sua respiração), têm crescimento relativamente lento comparado aos demais organismos presentes no solo e na água, mas podem sobreviver em ambientes terrestres e aquáticos. Compõe-se de espécies mesofílicas (crescem em temperatura por volta de  $30^\circ\text{C}$ ) e espécies termofílicas (crescem em temperaturas entre  $50^\circ\text{C}$  e  $70^\circ\text{C}$ ) (POSTGATE, 1984).

No que tange os valores de pH, as BRS crescem em valor ótimo de 7,2, mas encontram-se também espécies que toleram ambientes altamente ácidos (pH 4,0) e alcalinos (pH 9,5). Destaca-se ainda a capacidade das BRS suportarem altas pressões, como valores em torno de 105 kPa (espécies barofílicas). Todas essas características demonstram a habilidade desse grupo de microrganismos para

crescer em condições extremas e sua adaptabilidade a vários ambientes naturais (POSTGATE, 1984)

As BRS obtêm a energia necessária para o seu crescimento por meio da oxidação de matéria orgânica (proteínas ou lipídeos) ou do hidrogênio das águas residuais, reduzindo o sulfato em H<sub>2</sub>S, de acordo com as Equações 12 e 13:



Dois gêneros de bactérias foram conhecidos por muito tempo (*Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum*), mas recentemente novos gêneros foram identificados (*Desulfobacter*, *Desulfonema* e *Desulfobulbus*). O Gênero *Desulfovibrio* é mais conhecido porque seus membros são relativamente fáceis de isolar e purificar. São usualmente mesofílicos e gram-negativos (adquirem colocação vermelha na identificação). Recentemente foi identificado que as BRS podem tolerar a presença de oxigênio por períodos curtos, até no máximo 24h, o que faz com estas sejam as bactérias mais abundantes em águas residuais (HONDJUILA MIOKONO, 2013).

Diferentes fatores influenciam na emissão de H<sub>2</sub>S produzido pelas BRS nas redes de esgoto: o pH das águas residuais (quanto mais ácido maior emissão), os efeitos mecânicos (quanto maior a turbulência maior a emissão), a presença de metal nas águas residuais (o H<sub>2</sub>S pode precipitar na presença de alguns metais, como ferro, cobre e chumbo) (ZHANG *et al.*, 2008).

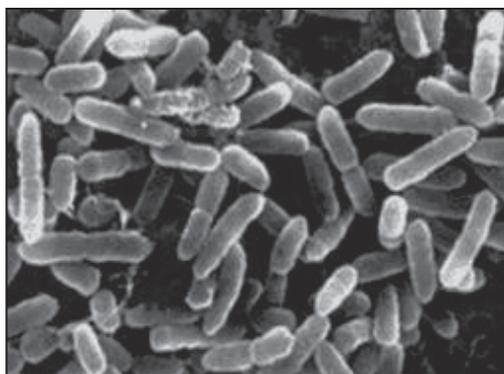
### 3.1.5.2 As Bactérias Oxidantes de Enxofre (BOE)

As bactérias oxidantes de enxofre (BOE) são bactérias quimioautotróficas (utilizam a energia das reações de oxidação de compostos inorgânicos para seu metabolismo), gram-negativas e de respiração aeróbia (precisam de oxigênio) (WAKSMAN e JOFFE, 1922). Elas obtêm a energia que necessitam para crescer oxidando compostos de enxofre como sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), enxofre elementar (S<sup>0</sup>), thiosulfato (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>), tetrionato (S<sub>4</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). A oxidação destes compostos é acompanhada por uma diminuição no pH (PARKER e PRISK, 1953).

Em 1945, Parker isolou de uma superfície de concreto deteriorada, pela primeira vez, as BOE e listou-as como sendo do gênero *Thiobacillus*, sendo, segundo o autor, a espécie *Thiobacillus concretivorus* a responsável pela corrosão do concreto. O autor constatou, então, que os danos encontrados nas redes de esgoto não eram causado pelo H<sub>2</sub>S e sim pelo ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) produzido por estas bactérias, por meio da oxidação do H<sub>2</sub>S, resultando em superfícies com pH abaixo de 1. Desde então cinco espécies do gênero *Thiobacillus* foram identificadas no processo de biodeterioração do concreto em redes de esgoto, dentre elas: *T. thioparus*, *T. novellus*, *T. neapolitanus*, *T. intermedius* e *T. thiooxidans* (ISLANDER *et al.*, 1991) o que já foi confirmado por diversos autores (MORI *et al.*, 1992; DAVIS *et al.*, 1998; VINCKE *et al.*, 1999; OKABE *et al.*, 2007).

A partir de 2000, algumas espécies do gênero *Thiobacillus* sofreram uma reclassificação, baseada na composição de seu DNA, comparação da sequência genética e fisiologia. Alguns membros deste gênero passaram a ser identificados como *Acidithiobacillus* (passou a conter as espécies *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus caldus* e *Thiobacillus albertensis*), *Halothiobacillus* (passou a conter as espécies *Thiobacillus neapolitanus*, *Thiobacillus halophilus* e *Thiobacillus hydrothermalis*) e *Thermithiobacillus* (passou a conter a espécie *Thiobacillus tepidarius*). A espécie isolada por Parker (1945a) *Thiobacillus concretivorus* foi considerada sinônimo da espécie *Thiobacillus thiooxidans*, sendo retirada da lista oficial de espécies (KELLY e WOOD, 2000). A Figura 20 mostra uma imagem de microscópio eletrônico da espécie *Acidithiobacillus thiooxidans*.

Figura 20: Imagem de microscópio eletrônico de *Acidithiobacillus thiooxidans*



Fonte: Khan *et al.* (2012)

Segundo Pikaar (2014), a presença de cada uma das espécies no meio depende da disponibilidade de nutrientes e do pH da superfície do concreto. Entre estas espécies existem as bactérias oxidantes de enxofre neutrófilas (BOEN), as quais crescem em locais com pH mais básico e as bactérias oxidantes de enxofre acidófilas (BOEA), as quais crescem em locais com pH mais ácido. As BOEN não representam risco imediato para a estrutura, porém agem como potencializados da sucessão de BOEA. Estas, por sua vez, estão associadas à deterioração severa do concreto (VINCKE *et al.*, 1999; DAVIS *et al.*, 1998).

As BOEN incluem as espécies *T. thioparus*, *T. novellus*, *H. neapolitanus*, *T. intermedius*, apresentam uma faixa de pH de crescimento entre 1,0 e 1,9. Já as BOEA compreendem as espécies *A. thiooxidans* e possuem um intervalo de pH de crescimento entre 0,5 e 4, conforme descreve o Quadro 4 (OKABE *et al.*, 2007; ROBERTS *et al.*, 2002; MORI *et al.*, 1992).

Quadro 4 - Características de crescimento das BOE

Espécie de BOE	pH de crescimento	pH ótimo de crescimento	Temperatura ótima de crescimento	Fonte de Enxofre
<i>T. thioparus</i>	4,5 – 10	7	28°C a 30°C	$H_2S$ , $S^0$ , $S_4O_6^{2-}$ , $S_2O_3^{2-}$
<i>T. novellus</i>	5,7 – 9	7	28°C a 30°C	$H_2S$ , $S^0$ , $S_4O_6^{2-}$ , $S_2O_3^{2-}$
<i>T. intermedia</i>	1,9 – 9	6,4 – 6,8	28°C a 30°C	$S_2O_3^{2-}$
<i>H neapolitanus</i>	3,0 – 8,5	6	28°C a 30°C	$H_2S$ , $S^0$ , $S_4O_6^{2-}$ , $S_2O_3^{2-}$
<i>A. Thiooxidans</i>	0,3 – 4	2 – 3,5	28°C a 30°C	$H_2S$ , $S^0$ , $S_4O_6^{2-}$

Fonte: HONDJUULA MIOKONO, (2013)

### 3.1.6 O ciclo do enxofre

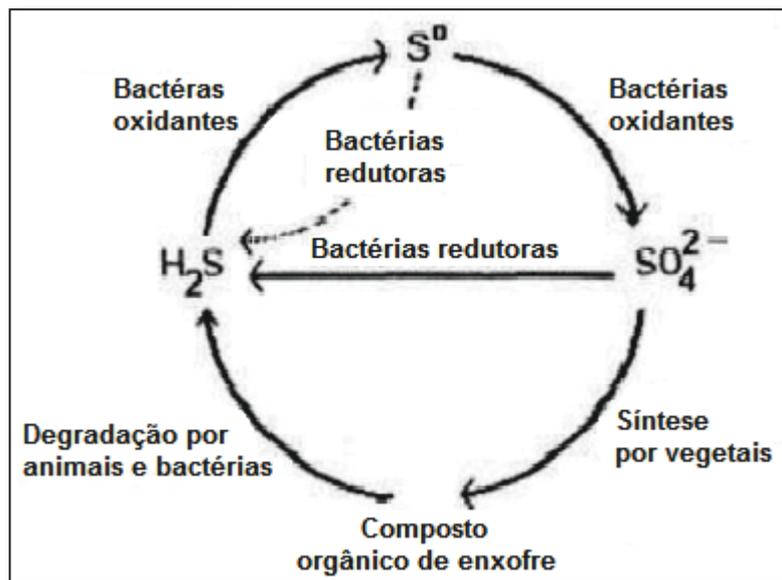
Na natureza encontram-se quatro formas principais de compostos de enxofre: sulfato ( $SO_4^{2-}$ ), sulfeto ( $H_2S$ ,  $HS^-$ ,  $S^{2-}$ ), enxofre elementar ( $S^0$ ) e compostos orgânicos sulfídricos (R-SH). O tipo de sulfeto no meio depende do pH. Em um pH ácido o sulfeto será volátil como  $H_2S$ . O  $HS^-$  é a forma predominante a um pH neutro, e  $S^{2-}$  é a forma predominante em um pH alcalino (KOYDON, 2004).

O enxofre pode ser encontrado em diversos ambientes naturais. A água do mar é o

maior reservatório de sulfato (BITTON, 2005). No ar pode-se encontrar dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), sulfato,  $\text{H}_2\text{S}$  e dimetilsulfeto, os quais podem alcançar a superfície do solo pela precipitação das chuvas, afetando a qualidade dos corpos d'água superficiais ou dos solos (KOYDON, 2004). Nos esgotos ou corpos d'água contaminados as principais fontes de enxofre são o enxofre orgânico encontrado em excrementos humanos, e o sulfato, que é o ânion de maior prevalência em corpos d'água naturais (BITTON, 2005).

Segundo Diniz (2015), o ciclo do enxofre é regido por reações de oxidação e redução, que são as responsáveis pelas conversões, as quais podem ser realizadas por via química ou biológica. Nos processos biológicos vários microrganismos catalisam a oxidação e redução das diferentes formas de enxofre estabelecendo assim um ciclo, conforme Figura 21.

Figura 21: O ciclo do enxofre



Fonte: Shirakawa (1994)

Segundo Videla (2003), muitas bactérias relacionadas aos processos de corrosão fazem parte do ciclo de enxofre da natureza, onde o enxofre elementar ( $\text{S}^0$ ) e várias de suas formas oxidadas são produzidas pelas BOE, e sulfetos como  $\text{H}_2\text{S}$  são reduzidos por BRS, bactérias que participam de diferentes maneiras no processo da biodeterioração.

## 3.2 CORROSÃO DO CONCRETO INDUZIDA MICROBIOLOGICAMENTE (CCMI)

### 3.2.1 Redes de Saneamento

Os sistemas de esgoto são estruturas que coletam os rejeitos sanitários de propriedades domésticas ou industriais, transportando-os por meio de canalização subterrânea até as estações de tratamento de esgoto (ETE), para que sejam tratados antes do descarte em corpos de água receptores. Protege, assim, a população de se expor a condições anti-higiênicas e odores nocivos, além de reduzir a incidência de doenças transmitidas pelo esgoto (PIKAAR *et al.*, 2014).

Estes sistemas consistem em diversos elementos, desde as estruturas de coleta do esgoto, como caixas de passagem, poços de visita, galerias, tubulações, até as estações elevatórias e estações de tratamento. O efluente que flui para o sistema de esgoto contém componentes orgânicos ou inorgânicos, o que garante as condições adequadas para o crescimento e a atividade de vários microrganismos (SUN, 2015). Segundo o autor, na Austrália, nos Estados Unidos e na Europa, a maior parte das casas está ligada ao sistema de esgotos, por exemplo, 99% da população nos Países Baixos, 96% na Alemanha e 86% na Bélgica.

Em 2000, os Estados-membros das Nações Unidas, adotaram a Declaração do Milênio, onde foram estabelecidos oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), a fim de aumentar o desenvolvimento e eliminar a pobreza dos países, com prazo para serem alcançados até 2015. O objetivo 7 visa garantir a sustentabilidade ambiental e inclui uma meta que desafiava a comunidade global em reduzir pela metade, em cada país, o número de pessoas sem acesso seguro e sustentável à água potável e ao saneamento básico, entre 1990 e 2015 (OMS e UNICEF, 2015).

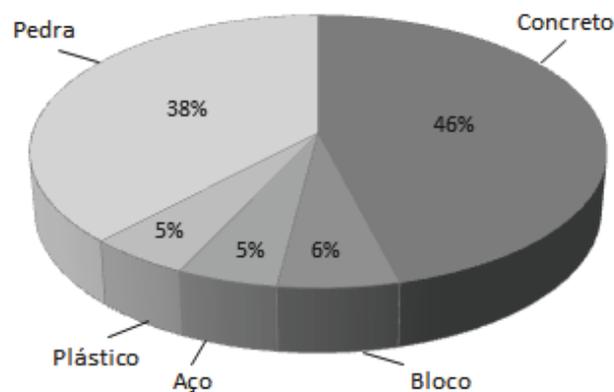
Segundo um relatório conjunto da UNICEF e da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2015, o uso de instalações sanitárias aumentou de 54% para 68% da população global, entre 1990 e 2015, sem atingir, porém, a meta de 77% definida pelo ODM. Desde 1990, 2,1 bilhões de pessoas no mundo (quase um terço da população global) passaram a ter acesso a instalações sanitárias adequadas,



Há décadas, devido ao seu baixo custo, grande disponibilidade e flexibilidade para ganhar formas importantes para construção redes de saneamento, o concreto tem sido o material mais utilizado nestas obras. Soluções mais caras em tubos de ferro fundido também são usadas, mas ainda assim exigem a presença de uma capa de argamassa em seu interior para evitar a sua corrosão. No entanto, em locais onde está sujeito a agentes agressivos o concreto se torna vulnerável para uma deterioração prematura, o que pode levar a interrupções nos sistemas e até grandes catástrofes, afetando a população em geral (SOLEIMANI, 2012). Desta forma, embora o concreto ou argamassa nas redes de esgoto sejam concebidos para durar de 50 a 100 anos, estudos mostram que, em alguns casos, sua duração é reduzida a 10 ou 20 anos (JACOBSEN *et al.*, 2002; MONFRONT, 2007).

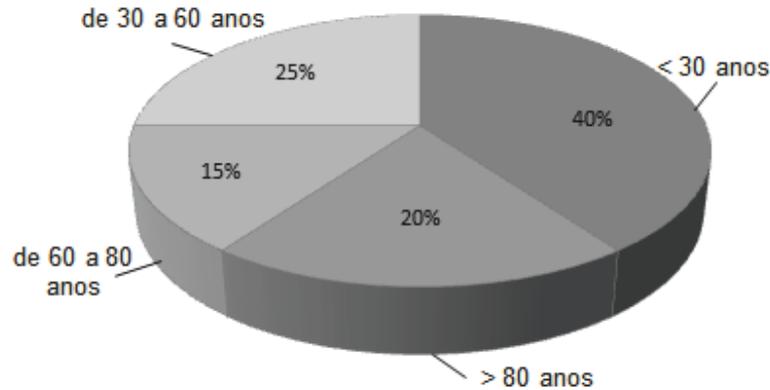
Kempfer e Berndt (1999) mostram alguns dados técnicos das estruturas de saneamento da Alemanha. A Figura 23 mostra que 46% das obras de saneamento no país são feitas em concreto. A Figura 24 mostra que 40% dos sistemas de esgoto, possuem vida útil inferior a 30 anos. Por fim, a Figura 25 cita as principais manifestações patológicas encontradas nestas estruturas.

Figura 23: Gráfico dos materiais mais utilizados na construção de redes de esgoto na Alemanha



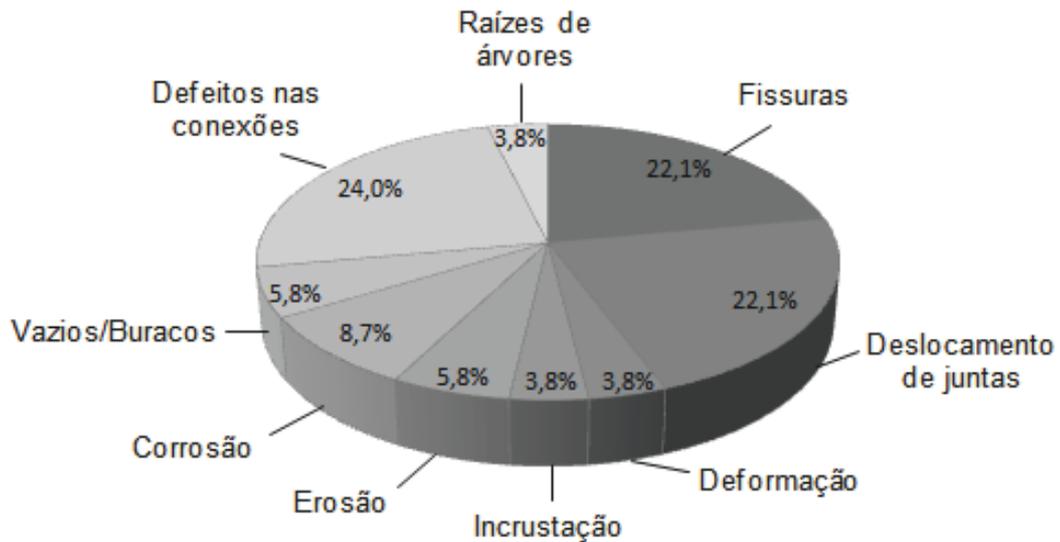
Fonte: Kempfer e Berndt (1999)

Figura 24: Gráfico da vida útil das estruturas de saneamento na Alemanha



Fonte: Kempfer e Berndt (1999)

Figura 25: Gráfico dos principais danos nas estruturas de esgoto da Alemanha



Fonte: Kempfer e Berndt (1999)

Como já mencionado, a principal forma de biodeterioração em estruturas de saneamento é a CCMI. Os danos associados a este problema estão ligados à perda de resistência das tubulações, galerias e demais elementos constituintes dos sistemas de esgoto, os quais entram em colapso e podem causar catástrofes como, por exemplo, a abertura de crateras em ruas e rodovias, a conseqüentemente a contaminação do solo e do lençol freático por águas contaminadas, além de prejuízos financeiros com a manutenção ou substituição de milhares de quilômetros de tubulações e equipamentos em geral, como mostra a Figura 26 (ASCE, 2001).

Figura 26: Prejuízos associados à biodeterioração de sistemas de saneamento



Fonte: ASCE (2001)

As obras de manutenção em sistemas de saneamento envolvem tratamentos e reparos muitas vezes difíceis, onerosos e que geram transtornos e inconvenientes para a população, pois dependem de interdição de vias de acesso às tubulações, desvios de tráfego, interrupção do tratamento nas estações, equipamentos e mão de obra especializados, dentre outros recursos (HERISSON, 2012). Além dos altos custos com a construção de novas instalações de saneamento, os custos relacionados à manutenção e reabilitação destes sistemas, públicos ou privados, são muito elevados. Tais manutenções podem ser necessárias devido a uma deterioração física, química ou microbiológica.

### 3.2.2 Processos químicos e biológicos nas redes de saneamento

Segundo Hvitved-Jacobsen *et al.* (2013), o esgoto faz parte de um sistema complexo, podendo ser dividido em cinco fases, dentro das quais ocorrerão os processos químicos e biológicos do sistema: a fase de água (incluindo as partículas em suspensão), os biofilmes, os sedimentos, a atmosfera do sistema e as paredes da estrutura.

As águas residuais, que possuem pH geralmente entre 7,0 e 8,0, são ricas em matérias orgânicas, como proteínas e aminoácidos e diversos compostos de enxofre. Os sulfetos, por exemplo, podem existir nas formas  $S^{2-}$ ,  $HS^-$  ou  $H_2S$  dependendo do pH local. O sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) é produzido principalmente

pela redução anaeróbica de enxofre inorgânico (por exemplo, os íons sulfatos -  $\text{SO}_4^{2-}$ ) nos biofilmes que crescem na rede esgoto, pela ação das BRS. Em condições anaeróbicas o  $\text{H}_2\text{S}$  produzido nos biofilmes submersos pode migrar para áreas com menor concentração de sulfeto. Com o fluxo e turbulência das redes, o  $\text{H}_2\text{S}$  pode ser liberado para a atmosfera do sistema. Portanto, níveis consideráveis de  $\text{H}_2\text{S}$  podem acumular-se no esgoto tanto na fase líquida, quanto na fase gasosa (HVITVED-JACOBSEN *et al.*, 2013).

A formação de  $\text{H}_2\text{S}$  nas redes é um grande problema, especialmente em locais onde o clima é mais quente, devido a certas características negativas que possui, como: mau cheiro, alta toxicidade e suas fortes propriedades corrosivas em diversos tipos de materiais metálicos ou cerâmicos (VINCKE, 2002).

O sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) produzido pela ação das bactérias redutoras de sulfato (BRS) na fase da água e que é liberado para a atmosfera do sistema é, em seguida, oxidado em ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) pelas bactérias oxidantes de enxofre (BOE) presentes na parede da estrutura. O  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , por sua vez, concentra-se nos poros do material, causando a corrosão do mesmo e uma deterioração responsável por fazer com que estas estruturas tenham um desempenho satisfatório por um tempo muito inferior ao esperado para sua vida útil (HVITVED-JACOBSEN *et al.*, 2013).

Desta forma, segundo EPA (1991), para que a CCMI se inicie quatro condições fundamentais devem existir:

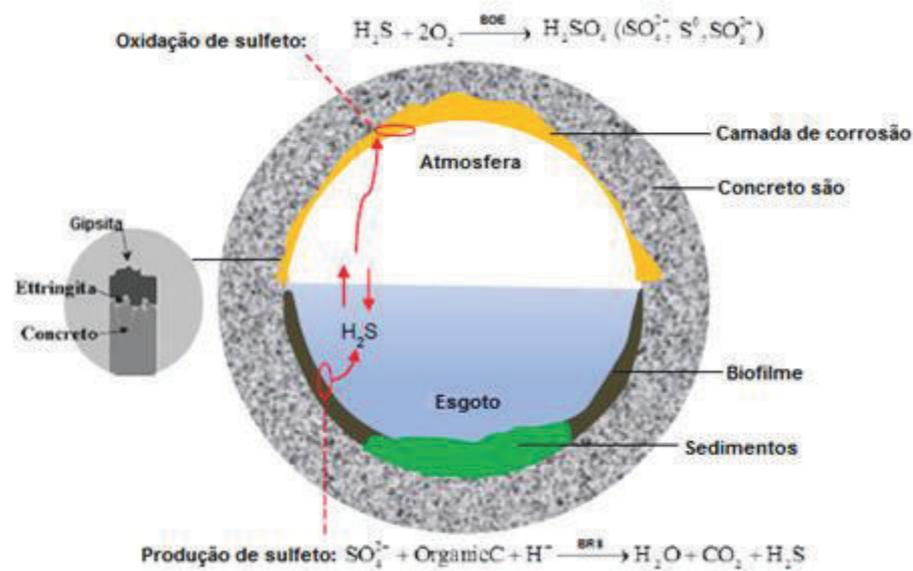
1. Ausência ou níveis muito baixos de oxigênio dissolvido (OD) no efluente, preferencialmente OD menor que 1. Esta quantidade depende da velocidade e características do efluente, tempo de detenção hidráulica e temperatura;
2. Geração de sulfetos no esgoto e liberação de gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) para a atmosfera do esgoto, o que ocorre por ação bacteriana. A formação de sulfetos depende da concentração de matéria orgânica, nutrientes e temperatura para metabolismo das bactérias. Sua liberação na forma gasosa depende do pH do efluente, turbulência do sistema e temperatura do meio.

3. Presença de umidade na superfície do material que será corroído, o que garante a existência e crescimento das BOE;
4. Material suscetível à corrosão por ataque de ácido sulfúrico. A taxa de corrosão está associada à temperatura, quantidade de H<sub>2</sub>O disponível para ser convertido em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e à baixa resistência do material a tal ataque.

### 3.2.3 O Mecanismo da CCMI

As estruturas de concreto dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto estão sujeitas à ação de um complexo processo multifatorial de corrosão microbiologicamente induzida. A Figura 27 mostra uma representação esquemática deste fenômeno.

Figura 27: Representação da biodeterioração em uma tubulação de esgoto



Fonte: Modificado de Sun (2015)

Segundo Sun (2015), a CCMI é um processo que acontece em basicamente 5 etapas, conforme descrito a seguir:

1. Primeiramente, na parte submersa da tubulação, ou seja, em condições anaeróbicas, os íons sulfatos presentes nos efluentes são convertidos em H<sub>2</sub>S<sub>(aq)</sub> por bactérias redutoras de sulfato (BRS);
2. Em seguida, o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S<sub>(aq)</sub>), o qual é pouco solúvel e fortemente volátil, é liberado na fase gasosa (H<sub>2</sub>S<sub>(g)</sub>) com ou sem ajuda da

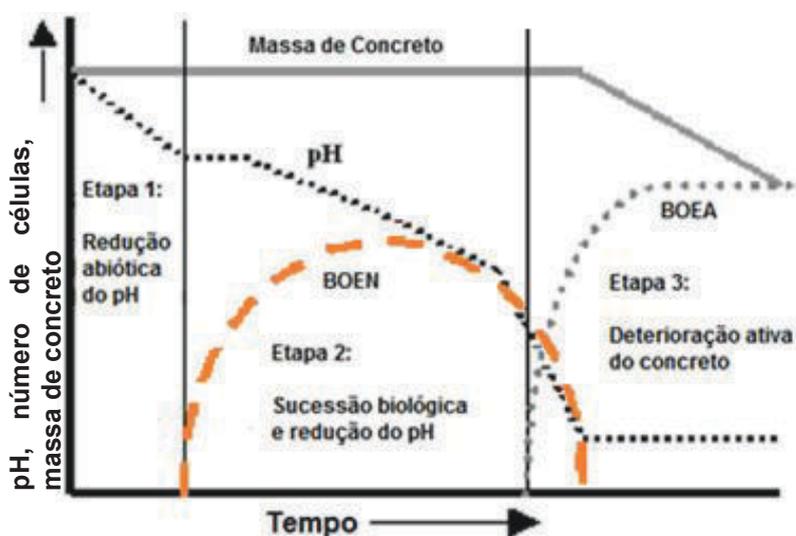
- turbulência (quando há turbulência, há um aumento significativo na liberação do gás);
3. Depois, o  $H_2S_{(g)}$  liberado é oxidado por bactérias oxidantes de enxofre (BOE) presentes na fina camada de umidade da superfície do concreto, e transformado em ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ );
  4. Assim, o  $H_2SO_4$  começa a atacar a pasta de cimento do concreto causando a descalcificação do hidróxido de cálcio ( $Ca(OH_2)$ ) e os silicatos hidratados (C-S-H), provocando a formação de produtos expansivos como etringita e gipsita secundárias;
  5. Por fim, na medida em que o ataque avança no material, os agregados graúdos ficam aparentes e o concreto perde seção, iniciando uma deterioração severa da estrutura.

As BRS crescem na camada de biofilme que cobre a superfície do efluente e, normalmente, o oxigênio não é capaz de permear esta camada, portanto, uma área anaeróbia é formada, sendo um local ideal para produção de sulfetos (JANA e LEWIS, 2005). A temperatura no local, o longo tempo de detenção hidráulica, a baixa velocidade de fluxo do efluente, a taxa de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), os níveis de turbulência e ventilação nas redes, dentre outros fatores, contribuem para o rápido crescimento bacteriano nos sistemas de esgoto subterrâneos (KEMPFER e BERNDT, 1999).

Já a oxidação de  $H_2S$  pelas BOE ocorre preferencialmente em locais onde a concentração de gás é maior que 2ppm, onde a umidade relativa e a turbulência do efluente são altas e também na presença de oxigênio (VAUGHN, 2007). Segundo Herisson (2010), o  $H_2S$  pode impactar o concreto de duas formas: de forma direta, reagindo com o material e provocando uma diminuição do seu pH ou de forma indireta, atuando como nutriente para as BOE, as quais irão produzir o  $H_2SO_4$  a partir deste gás.

Para melhor compreender todo o processo, a Figura 28 mostra uma representação gráfica das mudanças físico-químicas que da CCMI causa em redes de esgoto, em 3 etapas fundamentais.

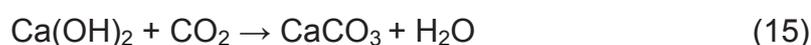
Figura 28: Mudanças físicas e químicas teóricas das propriedades do concreto ao longo do processo de biodeterioração



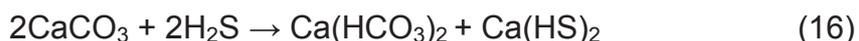
Fonte: Adaptado de Roberts *et al.* (2002)

A Etapa 1 mostra a acidificação inicial do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008), o concreto é naturalmente alcalino, com um pH variando na faixa de 11 a 13. Nesta fase inicial ocorre pouca atividade biológica, pois as BOE não são capazes de se desenvolver neste pH elevado. Porém, em tubulações de esgoto estão presentes substâncias como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , ambas com propriedades ácidas (ROBERTS *et al.*, 2002). Estas substâncias podem se dissolver na camada de água da superfície do concreto e reagir com os seus componentes, penetrando, em seguida, nos poros do material. Tais reações entre  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  com o concreto atuam na redução química do pH para aproximadamente 8 (SUN, 2015).

A reação entre o  $\text{CO}_2$  e os componentes do concreto, resulta na carbonatação do mesmo, ou seja, na formação de carbonato de cálcio, segundo as Equações 14 e 15, onde a primeira descreve a reação do  $\text{CO}_2$  com o C-S-H e a segunda descreve a reação do  $\text{CO}_2$  com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Segundo Sun (2015) ainda não é claro qual das duas reações é dominante no processo de carbonatação, porém sabe-se que ambas provocam a redução química do pH do concreto.



A outra reação responsável pela redução química do pH do concreto é a de dissolução do H<sub>2</sub>S presente no meio, como mostra a Equação 16. A concentração elevada de H<sub>2</sub>S gasoso está associada a uma alta taxa de acidificação. O H<sub>2</sub>S pode também ser quimicamente oxidado por várias espécies de enxofre como o enxofre elementar, polisulfetos, thiosulfetos ou sulfatos (JOSEPH *et al.*, 2010).



Como mencionado, a atividade biológica é muito limitada em ambientes com pH elevado. Entretanto, algumas pesquisas identificaram a presença de fungos que podem também contribuir para a fase inicial da redução do pH do concreto, possibilitando o crescimento de bactérias oxidantes de enxofre acidófilas (BOEA), por meio da produção de vários ácidos, tais como ácidos acético, oxálico e glicurônico, além de poderem, por si só, causar danos graves ao concreto (GU *et al.*, 1998; MORI *et al.*, 1992; PINHEIRO, 2003). A duração desta fase pode ser de meses ou anos, dependendo da concentração de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S no meio, além de outros fatores ambientais, tais como temperatura e umidade relativa (DAVIS *et al.*, 1998; KEMPFER e BERNDT, 1999; MONTENY *et al.*, 2000; HERISSON, 2012; WELLS e MELCHERS, 2014; JIANG *et al.*, 2015).

A Etapa 2 da Figura 28 mostra a colonização do biofilme e a diminuição adicional do pH. Nesta etapa o pH do concreto é aproximadamente 9 ou 8, existe quantidades suficientes de nutrientes, umidade e oxigênio no meio, portanto as bactérias do gênero *Thiobacillus* do tipo neutrófilas (BOEN), principalmente as espécies *T. novellus*, *T. neapolitanus*, *T. thioparus* e *T. intermedius*, começam a se fixar na superfície não submersa da tubulação e a se reproduzir. Isto acelera a redução do pH da superfície, uma vez que ocorre a produção de vários compostos de enxofre e, a medida que o pH cai, o concreto passa a ser colonizado por outros microrganismos, alterando a comunidade microbiótica do meio e novos organismos crescem. Esta sucessão bacteriana não é determinada apenas pelo pH da superfície, mas também pelos diferentes compostos de enxofre presentes no meio, nos diferente momentos do processo (ROBERTS *et al.*, 2002).

Nesta fase a deterioração do concreto é muito leve. Existe uma diversidade relativamente elevada de BOEN na camada de corrosão do concreto, porém ainda são poucos os estudos sobre a atividade microbiológica nessa etapa. Quando o pH diminui para 5 ou 4, a atividade de BOEN é gradualmente inibida devido ao baixo pH, passando a ser mais adequado para as bactérias oxidantes de enxofre acidófilas (BOEA) (ROBERTS *et al.*, 2002, SUN, 2015).

Na Etapa 3 ocorrem a corrosão severa e a perda de massa do concreto. Como resultado da colonização por BOEN, o pH do concreto sofre uma diminuição constante. Quando o pH está em torno de 4 ou 5 as bactérias do tipo acidófilas (BOEA), da espécie *T. thiooxidans*, começam a colonizar a superfície e se tornam o microrganismo dominante na superfície do concreto, oxidando os compostos de enxofre e produzindo grandes quantidades de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), podendo reduzir o pH do concreto a menos de 2, momento em que ocorre efetivamente a deterioração severa do material (DAVIS *et al.*, 1998; MILDE *et al.*, 1983).

Antes do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> começar a reagir com o concreto, os compostos hidratados do cimento como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) estão em um estado de equilíbrio, com o concreto apresentando um elevado valor de pH. Assim que a reação entre o ácido e concreto se inicia, a dissolução destes compostos hidratados começa a ocorrer. A taxa desta ação depende de fatores como a porosidade do concreto, a estrutura dos poros, o pH e a concentração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. O H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, por sua vez, migra da superfície exterior para o interior do concreto. Assim, a superfície exterior desempenha um papel importante na neutralização e impedindo a solução de penetrar no interior do concreto (HERISSON, 2012).

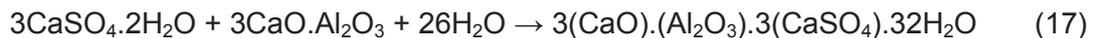
No momento em que o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> entra em contato com a matriz de cimento ocorre primeiramente uma reação com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formando uma massa de sílica hidratada não coesiva, conforme a Equação 19. Ocorre também a reação com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), formando o sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>) de acordo com a Equação 20 (DAVIS *et al.*, 1998).





Em seguida o  $\text{CaSO}_4$  é hidratado formando a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), cuja aparência é esbranquiçada, esponjosa e não possui propriedades coesivas, segundo Davis *et al.* (1998), sua consistência é de “queijo cottage”. Alguns autores afirmam que a gipsita pode causar um aumento de volume de 120% a 220% (MONTENY *et al.*, 2000). Outros, porém, afirmam que a mesma causa pouco aumento de volume no concreto (DAVIS *et al.*, 1998).

À medida que aumenta o ingresso de ácido no concreto, mais gipsita vai sendo formada. Esta, por sua vez, reage com o aluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ou com o monossulfoaluminato de cálcio hidratado ( $\text{C}_4\text{ASH}_{18}$ ) formando a etringita secundária (ou tardia), conforme as Equações 17 e 18.



A etringita é um produto expansivo que causa fissuras internas e desintegração do concreto, possibilitando ainda mais a penetração do ácido no material (DAVIS *et al.*, 1998). Para os autores, ela se forma numa região profunda, com alto valor de pH e próxima ao concreto não corroído. Ela pode causar um aumento de volume variando entre 227% a 700%, o que garante uma maior área de superfície para ser atacada pelo ácido (MONTENY *et al.*, 2000). Quando o pH diminui, a etringita não consegue manter uma estabilidade e acaba por se transformar em gipsita (MORI *et al.*, 1992).

Para alguns autores, apesar da formação de etringita e gipsita serem os maiores produtos de corrosão das estruturas de saneamento, eles não estão relacionados com o desenvolvimento de fissuras na frente de corrosão do concreto. Para Jiang *et al.* (2014), a dissolução de sais de ferro nos poros do cimento e a precipitação na frente de corrosão são responsáveis por causar micro fissuras no material, como mostra a Figura 29. Entretanto, tal processo ainda é pouco conhecido (SUN, 2015).

Figura 29: Camadas de concreto após CCMI



Fonte: Adaptado de Sun (2015)

### 3.2.4 Fatores que influenciam no processo da CCMI

A deterioração do ataque ácido no concreto, seja por ácido puro ou por ácido biogénico, se deve ao grau de interação do ácido com os materiais que compõem o material. Tais interações são de natureza complexa e requerem conhecimentos de química do cimento, de microbiologia e de boas práticas de engenharia civil, uma vez que estes conhecimentos podem auxiliar na seleção dos materiais e no projeto de estruturas adequadas para seu devido fim, aumentando assim a sua durabilidade. Portanto, os fatores que aceleram ou inibem a taxa de ataque precisam ser bem claros, tanto na concepção do projeto e escolha dos materiais, quanto na construção das estruturas de saneamento. Não apenas a escolha de materiais resistentes à CCMI influencia no processo, mas também o projeto das estruturas e sua correta execução (MOTSIELOA, 2012).

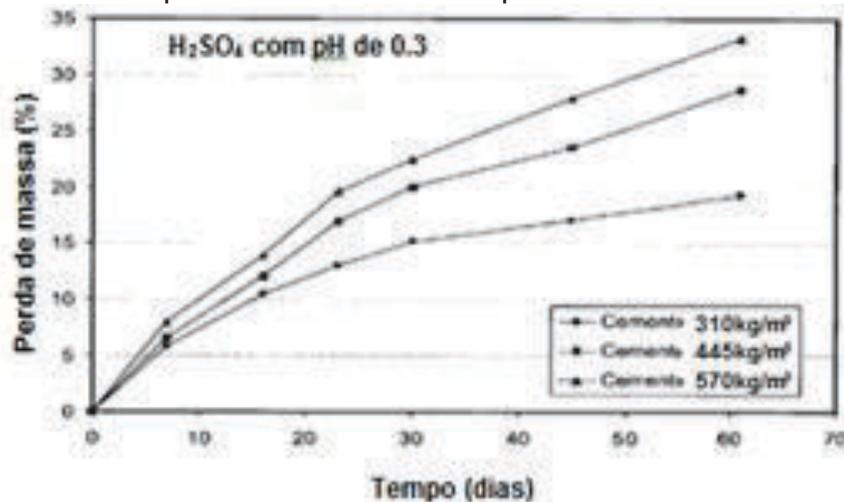
#### a) Fatores intrínsecos ao material

- Cimento

O teor de cimento é um fator de controle para as reações de hidratação do concreto e para o desenvolvimento da microestrutura. Segundo Hewayde (2007), o aumento do teor de cimento provoca uma diminuição da resistência do concreto ao ataque ácido. Em sua pesquisa o autor produziu 3 amostras de concreto com teores de

cimento de 310, 445 e 570 kg/m<sup>3</sup> e uma a/c de 0,35. As amostras foram imersas em solução de ácido sulfúrico com pH de 0,3, como mostra a Figura 30, e examinadas semanalmente, durante 8 semanas. Em cada ciclo, os corpos de prova eram removidos do banho de ácido, enxaguados com água e secos em estufa a 105°C, até apresentarem massa constante. Como medida da taxa de corrosão do concreto, foi usada a perda de massa devido à imersão em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e ciclos de molhagem e secagem. Os resultados mostram que para os corpos de prova com teor de cimento mais baixo, a resistência ao ácido foi muito superior.

Figura 30: Gráfico da perda de massa no tempo com diferentes teores de cimento



Fonte: Hewayde (2007)

Segundo Beddoe (2005), apesar do teor de ligante nas misturas aumentar a capacidade de neutralização e contribuir para sua resistência, teores muito altos podem resultar em camadas de corrosão porosas e facilitar a difusão de ácidos.

O cimento de aluminato de cálcio (CAC) é usado principalmente em ambientes agressivos, apresentando uma alta resistência a ácidos e um bom desempenho quando utilizado em redes de esgoto (ALEXANDER, 2001; SCRIVENER, 1999). Ao contrário do cimento Portland que tem um elevado teor de CaO (cerca de 60 - 65%) e produz cal livre em sua hidratação, a qual reage facilmente com o ácido, o CAC tem cerca de 36 - 42% apenas. Assim, o desempenho do CAC é devido à ausência de hidróxido de cálcio e aos seus produtos de hidratação estáveis (por exemplo, hidratos de alumina, estáveis mesmo a um pH entre 3 e 4) (SCRIVENER, 1999).

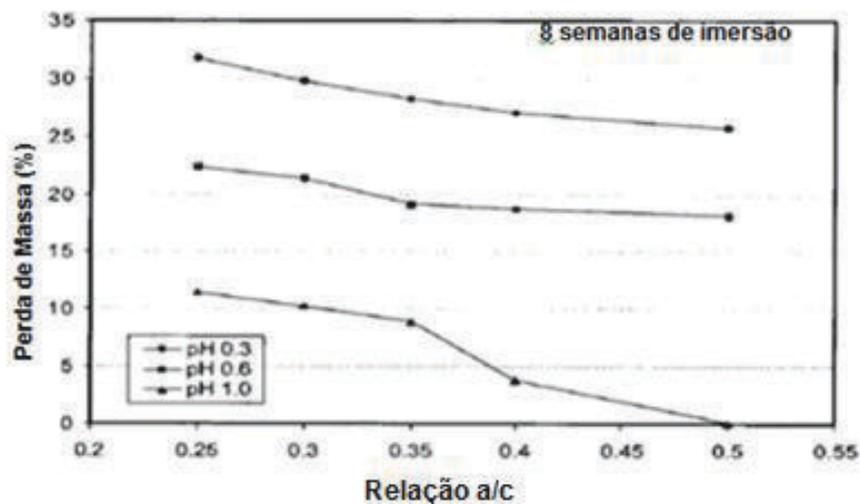
- Adições

Alguns estudos revelaram que o uso de pozolanas, como cinza volante e sílica ativa, gera poucos efeitos positivos na resistência do cimento Portland ao ataque ácido (PAVLIK *et al.*, 1997). No entanto, a contribuição por modificar a microestrutura do concreto, refinar a estrutura dos poros e reduzir do teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , aumentando o teor de silicato de cálcio, é sim capaz de fornecer alguma resistência ao ataque ácido ao concreto (ZIVICA, 2002; CHANDRA, 2002; ALEXANDER, 2011). Devido à sua finura, especialmente da sílica ativa, as pozolanas são capazes de preencher os poros do concreto e, assim, diminuir a penetração de íons agressivos no material. Vale ressaltar que o processo de cura é imprescindível para que o efeito da pozolana possa ser sentido no aumento da resistência ao ácido (ZIVICA, 2002).

- Relação água/cimento (a/c)

É sabido que a relação a/c do concreto afeta diretamente a sua durabilidade. Baixos teores de a/c melhoram suas propriedades mecânicas e químicas (HEWAYDE, 2007). Na fabricação das redes de esgoto é preferível a utilização de uma baixa relação (a/c), de 0,36 ou menos (FOURIE, 2007). Entretanto, no ataque ácido, dependendo de propriedades do ácido, a resistência do concreto aumenta à medida em aumenta a relação a/c, como mostra a Figura 31, do estudo de Hewayde (2007).

Figura 31: gráfico da relação entre a/c e a perda de massa



Fonte: Hewayde (2007)

Alguns autores atribuem o aumento da resistência do concreto ao ataque ácido pelo aumento da relação a/c ao fato de haver maior quantidade de cimento por unidade de volume nas misturas com maior a/c do que nas com menor a/c. Como o  $H_2SO_4$  ataca principalmente o  $Ca(OH)_2$  do cimento, qual é mais abundante em misturas com baixa a/c, as misturas com maiores valores de a/c terão maior resistência ao ataque ácido (FATTUHI e HUGHES, 1988a,b,c *apud* HEWAYDE, 2007).

Para Hewayde (2007), como o concreto com baixa a/c é relativamente mais denso e possui menos poros do que o concreto com alta a/c, conseqüentemente, quando o  $H_2SO_4$  ataca o concreto com baixa a/c esta estrutura mais densa previne a absorção do ácido pelo concreto. Assim, com o tempo, o ácido reage com a pasta de cimento produzindo alta degradação da superfície do material. No caso de concretos com alta a/c, devido a estruturas dos poros o concreto absorve maior quantidade de ácido, o qual reage com os compostos hidratados do cimento e forma uma camada de gipsita que envolve a superfície do concreto. Esta camada funciona como uma barreira que diminui novas reações químicas entre o ácido e os produtos hidratados intactos do concreto.

- Agregados

A reação dos agregados com os ácidos depende principalmente de dois fatores: da sua capacidade de neutralização dos ácidos (BEDDOE *et al.*, 2005) e da sua insolubilidade em ácido (FOURIE, 2007). Muitas pesquisas estudaram a utilização de agregados silicosos e calcários na resistência do concreto ao ataque ácido. Devido a sua insolubilidade em ácido, os agregados silicosos (granito) não reagem com o ácido, mas também não desempenham um efeito neutralizador para parar o ataque, deixando a pasta de cimento livre para ser atacada. Assim, o agregado se dissocia da pasta e fica aparente, afetando as propriedades de transporte do ácido, diminuindo a capacidade portante do concreto (ALEXANDER, 2001; CHANG, 2005).

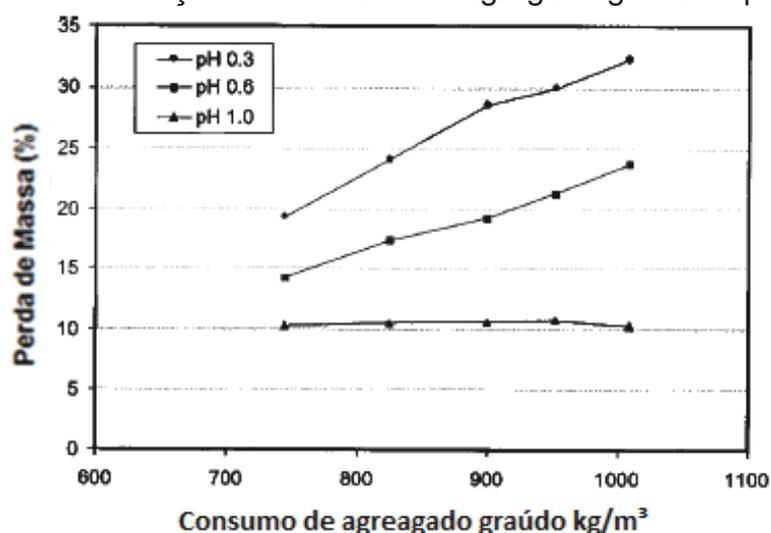
Os agregados calcários proporcionam um efeito de “material de sacrifício” no concreto exposto ao ácido, pois contêm mais íons de carbonato dissolvidos, o que aumenta a capacidade de neutralização do concreto ao ataque ácido (CHANG,

2005; GOYNS, 2004). Assim, a vida útil de tubulações de esgoto utilizando agregados calcários é de 3 a 5 vezes maior do que quando são usados agregados silicosos. (BERNARD, 1967 *apud* CHANG, 2005).

Como os caminhos de difusão dos ácidos para o interior do concreto dependem da porosidade e permeabilidade da pasta de cimento endurecida, o tamanho e a quantidade de agregado podem controlar a direção deste caminho, aumentando ou diminuindo a resistência ao ataque ácido (CHANDRA, 2002; HEARN *et al.*, 1994).

Em sua pesquisa Hewayde (2007) notou que, no ataque ácido, quanto maior o consumo de agregado do corpo de prova maior a perda de massa, como mostra a Figura 32. Para o autor, como o concreto com maior consumo de agregado possui menor teor de pasta de cimento na superfície disponível para reagir com o ácido, a profundidade da deterioração será maior neste caso do que nas amostras com menor consumo de agregado, uma vez que estas últimas irão apresentar uma deterioração mais superficial, e menor perda de massa.

Figura 32: Gráfico da relação do consumo de agregado graúdo e perda de massa



Fonte: Hewayde (2007)

- Porosidade do concreto

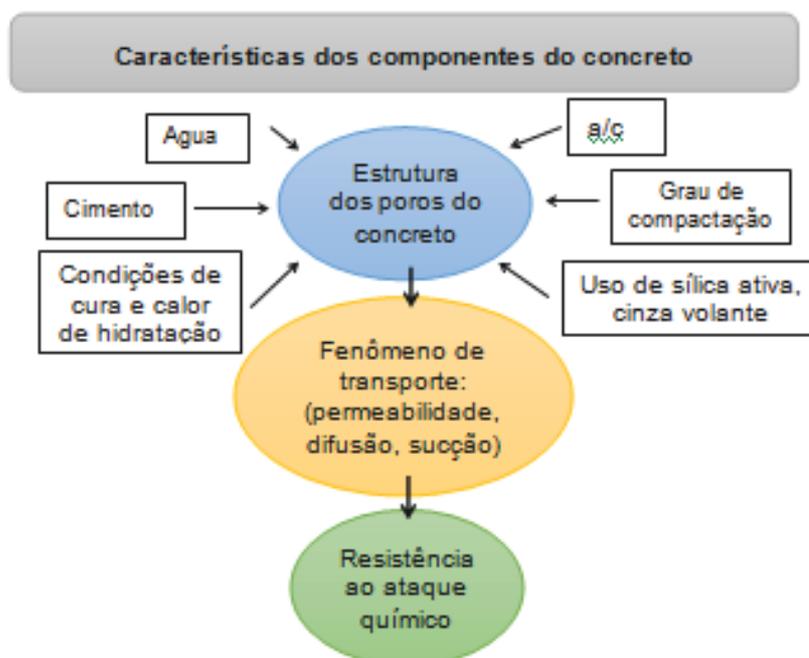
Durante as reações de hidratação do cimento (Portland ou CAC) algumas moléculas de água são liberadas na formação dos compostos hidratados gerando, assim,

espaços vazios no concreto endurecido (HEARN *et al.*, 1994). Além disso, alguns dos vazios são devido aos espaços que antes eram ocupados pela água que não reagiu com o cimento. A estrutura dos poros do concreto é o resultado da relação entre a/c e o teor de cimento (ZIVICA *et al.*, 2002).

A resistência química do concreto é uma função da estrutura dos seus poros, em que a permeabilidade do concreto, como um fenômeno de transporte, controla a entrada de íons ácidos para o interior do concreto. Parte da porosidade é afetada pelo grau de compactação, cura e pela adição de materiais pozolânicos, os quais reduzem o tamanho dos poros de uma pasta de cimento endurecido, inibindo assim o transporte de substâncias agressivas no material (CHANDRA, 2002).

A Figura 33 mostra os fatores que interferem na estrutura dos poros, como a relação a/c, o tipo de cimento, as condições de cura, uso de adições, dentre outros e como estes parâmetros interferem na resistência ao ataque ácido.

Figura 33: Relação dos fatores que afetam a porosidade e resistência do concreto



Fonte: Adaptado de Motsieloa (2012)

- Cura

Segundo Motsieloa (2012), alguns estudos mostraram que o uso de materiais

pozolânicos aumenta pouco a resistência do concreto ao ataque ácido. Em alguns casos isto pode ser devido à cura inadequada, pelos produtos de hidratação do cimento levarem um tempo maior antes de atingir a maturidade e estabilidade.

Fahutti e Hughes (1988) *apud* Motsieloa (2012) investigaram o efeito da cura na resistência de pastas de cimento endurecidas ao ataque ácido. Neste estudo, corpos de prova cúbicos foram curados em água durante 7, 14, 28 dias cada um e foram então imersos em solução de ácido sulfúrico 2%, por um período de 50 dias. Os resultados para pastas com  $a/c = 0,417$  mostrou que o aumento da cura de 7 a 28 dias reduziu a perda de massa em 75% depois da exposição ao ataque ácido.

#### **b) Fatores extrínsecos ao material**

A taxa de corrosão das estruturas de saneamento varia de acordo com os diferentes ambientes em que se encontram. Para facilitar a compreensão do processo da CCMI e, assim, poder prever a taxa de corrosão e fazer um planejamento das manutenções e reabilitações dos sistemas de esgoto, é importante compreender e identificar a relação entre os fatores ambientais e a taxa de corrosão de concreto (SUN, 2015).

Certas condições ambientais, relativas às redes de esgoto, como temperatura, umidade, pH, concentração de  $H_2S$  na fase gasosa, e efeitos mecânicos, presentes nestes ambientes também influenciam diretamente na biodeterioração das estruturas de concreto. Tais fatores serão detalhados a seguir.

- Temperatura

De acordo com Sun (2015), a temperatura média da atmosfera de um sistema de saneamento típico é relativamente constante no curto prazo, ou seja, nos dias e meses. Porém, a mesma pode sofrer variações com o passar das estações do ano. Além disto, a temperatura varia muito de um país para o outro. Por exemplo, enquanto na Austrália a temperatura é constante entre  $19^\circ$  e  $22^\circ$  durante o ano, no Japão pode variar de  $10^\circ$  no inverno a  $30^\circ$  no verão (MORI *et al.*, 1992).

A temperatura afeta o crescimento de microrganismos responsáveis pela CCMI.

Além disso, a temperatura é um fator que influencia nas velocidades das diferentes reações químicas envolvidas na deterioração do concreto e na taxa de difusão dos produtos das reações (MORI *et al.*, 1992).

Segundo Parande *et al.* (2005) e Hvitved-Jacobsen *et al.* (2013), a temperatura elevada do esgoto acelera a velocidade de conversão de íons sulfato à sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), aumentando a taxa de consumo de oxigênio. Além disto, a temperatura pode ter um impacto sobre as taxas de corrosão por afetar a oxidação química e biológica do H<sub>2</sub>S. Estudos mostraram que em biofilmes de esgoto as taxas de oxidação de H<sub>2</sub>S a 25°C foi cerca de 15% maior do que à 20°C, sendo que em temperaturas inferiores à 15,6°C, a atividade de bactérias oxidantes de H<sub>2</sub>S, tais como *Thiobacillus denitrificans*, foi inibida (SUBLETTE *et al.*, 1998).

Em seu estudo, Nielsen *et al.* (1998) *apud* Park *et al.*, (2014) correlacionou o aumento da temperatura com o aumento da produção de H<sub>2</sub>S, explicado pelo fato da temperatura aumentar o consumo de oxigênio do esgoto, mudando o ambiente anaeróbico e aumentando a taxa de sulfatos dissolvidos, os quais serão transformados em H<sub>2</sub>S pelas BRS.

- Umidade relativa

Nos sistemas de esgoto, a umidade relativa é determinada pela diferença de temperatura entre o esgoto e atmosfera da estrutura. Assim como a temperatura, a umidade também varia muito nos sistemas de esgoto de cada país. Segundo Wells *et al.* (2012) enquanto em Los Angeles (EUA) a umidade varia de 96% a 100%, em Sydney (Austrália) varia de 90% a 94%.

A água que circula nas tubulações de esgoto garante uma umidade relativa elevada na parte aerada dos mesmos. As BOE têm um desenvolvimento ótimo na presença de umidade relativa superior a 90%. Esta umidade é necessária para o processo de CCMI, pois promove a oxidação do H<sub>2</sub>S na superfície do concreto (ROBERTS *et al.*, 2002; EHRICH *et al.*, 1999). Além disso, a água é essencial para que ocorram as reações químicas envolvidas no processo, pois acelera a cinética de reação, atuando, por um lado como um substrato da reação e, por outro, como um

transportador de moléculas agressivas, isto é, dos íons sulfato, da superfície para o interior do material (ROBERTS *et al.*, 2002).

Estudos em laboratório e em sistemas de esgotos reais descobriram que uma umidade relativa elevada (95% a 100%) leva à redução do pH de superfícies mais externas do concreto durante a acidificação inicial, em comparação com uma umidade inferior (85% a 95%) (JOSEPH *et al.*, 2010; WELLS *et al.*, 2012). Para concretos mais corroídos, a alta umidade também pode levar ao aumento da perda de massa do mesmo (JIANG *et al.*, 2014a; WELLS *et al.*, 2012).

- O pH

O pH das águas residuais tem impacto tanto sobre as espécies microbianas que colonizam a parte submersa das tubulações, quanto sobre a natureza das espécies químicas presentes no meio. As águas residuais tem um pH de cerca de 6 a 7 e o H<sub>2</sub>S produzido pelas BRS encontra-se principalmente sob a forma H<sub>2</sub>S<sub>(aq)</sub> e HS<sup>-</sup> (YANG *et al.*, 2005; ROBERTS *et al.*, 2002).

O pH da superfície do concreto da tubulação de esgoto irá influenciar as taxas de colonização e na CCMI. Os mecanismos abióticos, como a carbonatação, lixiviação e adsorção de H<sub>2</sub>S sobre a superfície do concreto, tornam as superfícies suscetíveis à fixação de BOE (ROBERTS *et al.*, 2002).

Gutierrez *et al.* (2009) avaliaram a relação entre o pH e a atividade das BRS, fazendo uma comparação entre um ensaio em um reator real (pH controlado de 7,6) e um reator de escala laboratorial (pH 8,6 – 9,0) e observaram que a atividade bacteriana diminuiu 50% a um pH de 9,0 quando comparado ao reator real (pH7,6).

- Matéria Orgânica Biodegradável

A matéria orgânica é necessária como substrato para o crescimento do biofilme, podendo ser etanol, glucose, lactose, dentre outras. Nielsen e Hvitved-Jacobsen, (1988) *apud* Park *et al.* (2014) mostraram que quanto maior a taxa de matéria orgânica maior a redução de sulfatos a sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) na rede.

- Concentração de H<sub>2</sub>S

O H<sub>2</sub>S tem um papel fundamental na CCMI. A corrosão de estruturas de concreto de sistemas de esgoto em diferentes níveis de H<sub>2</sub>S já foi relatada em muitos países. Como mostrado na Tabela 3, na maioria dos casos, uma alta concentração de H<sub>2</sub>S está relacionada à uma alta taxa de corrosão. Porém, pode-se perceber também uma taxa severa de 10 mm/ano onde os níveis de H<sub>2</sub>S são baixos (2 - 4 ppm) em ensaios de laboratório (AESOY *et al.*, 2002). Mori *et al.* (1992) analisaram os níveis de H<sub>2</sub>S em relação à taxa de corrosão em seus experimentos. No ensaio in loco, em uma tubulação de esgoto perto da ETE de Ohmuta, Japão, a concentração de H<sub>2</sub>S variava entre 25 e 300 ppm, sendo medida, na superfície logo acima do nível de esgoto da tubulação de concreto uma taxa de corrosão entre 4,3 e 4,7 mm/ano. Isto significa uma corrosão nesta estrutura de, em média 88 mm, em 20 anos.

Tabela 3: Relação entre concentração de H<sub>2</sub>S e taxa de corrosão

Nível de H <sub>2</sub> S (ppm)	Temperatura (°C)	Taxa de corrosão (mm.ano <sup>-1</sup> )	Local	Pesquisa
5 – 400	10 – 30	4,3 – 4,7	Parede lateral	Mori <i>et al.</i> (1992)
5 – 400	10 – 30	1,4	Coroa	
25 – 300	12 – 30	7,6	CP de argamassa in loco	
400	13 – 28	3,8 – 6,1	Laboratório	
100	20	2,1 – 3,8	Laboratório	Ismail <i>et al.</i> (1993)
250	28	0,3 – 0,8	Laboratório	Vincke <i>et al.</i> (2002)
2 – 4	25	10	Laboratório	Aesoy <i>et al.</i> (2002)
15 - 25	25	14	Laboratório	
10 -50	-	3,6 - 6	In loco	Satoh <i>et al.</i> (2009)
79	26	12	In loco	Wells (2014)
5 – 50	17 – 30	0,7 – 1,2	Laboratório	Jiang <i>et al.</i> (2014a)

Fonte: Adaptado de Sun (2015)

Embora tenha sido dito por muito tempo que o nível de H<sub>2</sub>S gasoso no meio está relacionado com a taxa de corrosão do concreto, este processo ainda é pouco compreendido. A CCMI é um processo difícil de estudar devido à sua progressão lenta, o que dificulta uma medição direta que permita correlacionar com fatores relevantes em condições reais. Muitos estudos laboratoriais relacionadas à CCMI

são conduzidos por ensaios aceleradas, realizados sob condições muito diferentes daqueles encontradas em esgotos reais (SUN, 2015). Em alguns testes laboratoriais, a fim de acelerar a velocidade de corrosão, o concreto é exposto à concentrações de  $H_2S$  gasoso muito elevadas (acima de 1000 ppm) ou à níveis muito elevados de ácido sulfúrico (DE BELIE *et al.*, 2004; VOLLERTSEN *et al.*, 2008), o que pode resultar numa alteração na natureza da corrosão.

Desta forma, são inúmeros os estudos de laboratório realizados em condições estritamente controladas, a fim de simular de forma precisa o ambiente de esgoto, com níveis reais de  $H_2S$  (SUN, 2015). Alguns foram realizados em conjunto com estudos *in loco* para identificar a relação entre o nível  $H_2S$  e taxa de corrosão (JOSEPH *et al.*, 2010; WELLS *et al.*, 2012).

- Efeitos mecânicos

Segundo Hondjuila Miokono (2013), as redes de esgotos são ambientes dinâmicos, sujeitos a turbulências, o que tem influência direta sobre o metabolismo das BRS, e, conseqüentemente, de BOE. Tais efeitos mecânicos têm um impacto sobre a composição das águas residuais na parte submersa das redes, como:

1. Na renovação de nutrientes e de substâncias químicas disponíveis, ou seja, a quantidade de sulfatos;
2. Na quantidade de oxigênio dissolvido (OD), o qual tem de ser reduzido a fim de promover condições necessárias para o desenvolvimento da BRS (bactérias anaeróbicas);
3. Na emissão de  $H_2S$  para a parte aerada das estruturas.

Estes mesmos efeitos mecânicos também têm impacto sobre o avanço da CCMI na parte visível (aeróbia) da estrutura, como:

1. Perturbação das superfícies que levam ao descolamento de camadas deterioradas das superfícies de concreto, o que leva à exposição de áreas sãs, as quais também serão atacadas por  $H_2S_4$  produzido pelas BOE provocando ainda mais corrosão;

2. Contribuição para o ingresso do ácido produzido pelas BOE pelos poros do material, favorecendo a drenagem de produtos decorrentes da decomposição dos componentes da matriz de cimento hidratado.

### c) Outros fatores

Segundo Goyns (2008), o projeto das redes de saneamento deve ser bem executado e prever o tempo de detenção hidráulica das águas residuárias. Períodos muito longos, superiores a 1 hora com esgotos com elevada demanda bioquímica de oxigênio (na ordem de 100 mg/l), pioram a disponibilidade de OD, promovendo a geração de sulfetos. Este efeito é maior para redes projetadas em terrenos planos.

A velocidade do fluxo de esgoto também é um fator determinante para a CCMI. Velocidades inferiores a 0,6 m/s propiciam o depósito e acúmulo de lodo na estrutura, o que favorece a colonização das bactérias. Porém, velocidades em excesso, superiores a 1,5 m/s promovem uma turbulência que gera a liberação de H<sub>2</sub>S para a parte aeróbia da tubulação (SANTRY, 1963 *apud* MOTISIELOA, 2012; Hvitved-Jacobsen *et al.*, 2013). Para Yongsiri *et al.* (2004a) *apud* Jensen (2009) também, o aumento da turbulência aumenta a emissão de H<sub>2</sub>S no meio.

Segundo Herisson (2012), outros três fatores culturais já mencionados contribuem para a ocorrência da CCMI em estruturas de saneamento:

- Sistemas de esgoto muitas vezes superdimensionados por levarem em conta um crescimento futuro, e pelo aumento de pessoas que vivem nas áreas periféricas e subúrbios, longe das cidades, o que faz com que os sistemas se estenderem por distâncias cada vez maiores, propiciando grande acúmulo de sedimentos, principalmente em locais planos;
- Redução do consumo de água, que leva a limitar as taxas de fluxo do efluente e favorecer uma maior detenção hidráulica;
- Aumento das temperaturas (maior uso de máquinas de lavar roupa e louça, banhos quentes), aumentando as taxas de reações bioquímicas. Sand *et al.* (1994) estimam um aumento de 10°C nas últimas décadas;
- O aumento do uso de detergentes causando a acidificação do meio.

### 3.2.5 Formas de medição da CCMi

A corrosão do concreto é um processo não linear em relação ao tempo. Esta não linearidade dificulta uma modelagem precisa da atividade de corrosão, o que exige uma compreensão mais sistemática e rigorosa de todo o processo de corrosão. Desenvolver metodologias confiáveis para monitorar a atividade de corrosão é muito importante e necessário (SUN, 2015). Segundo o autor, atualmente diversas abordagens são usadas para monitorar e analisar os processos de corrosão em estruturas de saneamento. Tais análises podem incluir a determinação do pH da superfície de concreto, o controle da espessura da camada de corrosão, análise dos produtos de corrosão e caracterização microbiana dentro da camada de corrosão. A seguir são apresentadas as aplicações e desvantagens de cada um desses métodos.

- Monitoramento do pH da superfície

Segundo Joseph *et al.* (2010), o avanço da corrosão do concreto é acompanhada pela diminuição gradativa do pH da sua superfície. Conforme descrito em 3.2.3, durante a acidificação inicial do concreto, diferentes valores de pH na superfície irão surgir dependendo da severidade da corrosão, ou seja, o perfil de decréscimo do pH da superfície varia nas diferentes fases de corrosão (ROBERTS *et al.*, 2002; WELLS *et al.*, 2009). Portanto, o monitoramento do pH tem sido usado para facilitar a compreensão da progressão da corrosão

Segundo, Islander *et al.* (1991), quando ocorre uma corrosão avançada, o decréscimo do pH da superfície pára quando atinge cerca de 2. Neste nível o pH permanece relativamente constante, devido à neutralização parcial do ácido biogénico, em razão da alcalinidade liberada do concreto corroído quando ocorre algum grau de pulverização de esgoto no meio. Nestas condições, o pH da superfície deixa de ser um indicador do avanço de corrosão, o que torna o monitoramento deste parâmetro insensível em algumas condições de corrosão.

Sand *et al.* (1983) *apud* Diercks *et al.* (1991) em seu experimento, identificaram uma grande população de *T. thiooxidans* na superfície das amostras ensaiadas e o declínio no valor do pH da superfície do concreto foi o primeiro indicador do início do

processo de corrosão da mesma. Entretanto, devido a variedade de tipos diferentes de cimento utilizados nas amostras e também a quantidades diferente de  $H_2SO_4$  produzidos pelas bactérias, dificultou a realização de uma correlação do decréscimo de pH com a corrosão real do concreto. Para o autor, portanto, o valor apenas do pH pode não ser uma boa ferramenta para quantificar o processo da corrosão, sendo mais preciso, para tanto, a contagem de células de BOE.

- Perda de massa

Segundo Sun (2015), a perda de massa de concreto representa diretamente a sua degradação real devido à corrosão. Ela pode ser relacionada com a taxa de corrosão, sendo, portanto, uma medida útil e utilizada para inspecionar as condições de corrosão e avaliar a vida útil remanescente das estruturas de esgoto. Harbulakova *et al.* (2013), mostrou que os resultados da perda de massa nos ensaios em laboratórios de amostras com substituição de cimento por cinza volante se mostraram mais eficazes do que o concreto de referência.

Entretanto, existem desvantagens na utilização deste método. Em estudos de laboratório e de campo, a medição da perda de massa de concreto demanda anos de monitoramento, pela CCMI ser um processo lento. Além disto, na medição, é necessário eliminar os produtos de corrosão que dificultam o processo de corrosão em curso, o que torna impossível o monitoramento contínuo em uma única amostra. Por fim, é difícil determinar a perda de massa de uma secção ou área específica da estrutura. A maioria das técnicas utilizadas para medir a corrosão utiliza abertura de furos (o que cria perturbações adicionais), o que fornece a profundidade da camada de corrosão sendo, portanto, uma medida indireta da perda de massa. Vale lembrar ainda que este método é aplicável apenas para concretos em condições severas de corrosão, pois na fase inicial de acidificação ocorre pouca perda de massa, sendo uma medida pouco útil (SUN, 2015).

- Análise de produtos de corrosão

Como os produtos de corrosão da CCMI variam no tempo e espaço, a identificação e caracterização dos mesmos (carbonato, gesso, etringita ou minerais de ferro)

podem fornecer informações qualitativas do processo de corrosão (SUN, 2015).

Existem muitos métodos para a análise dos produtos de corrosão de concreto, por exemplo, análises químicas por fluorescência de raios-X, espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios-X e análise de imagens por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (ESTOKOV *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2014b; MONTENY *et al.*, 2000). Tais análises, porém, geralmente não fornecem informações quantitativas da corrosão, ou seja, identificam os produtos de corrosão, sem especificá-los quantitativamente (SUN, 2015).

- Análise microbiológica

No momento em que ocorre a sucessão bacteriana durante o avanço do processo da CCMI, ou seja, quando as comunidades microbianas dominantes mudam à medida que a corrosão progride, a análise microbiana passa a ser considerado um método valioso de investigação da atividade de corrosão (SUN, 2015).

Segundo Roberts *et al.* (2002), alguns estudos estabeleceram uma relação entre as taxas de corrosão e a análise quantitativa da população microbiana fazendo, assim, uma modelagem do processo de corrosão. No entanto, para Sun (2015), os resultados são limitados e não detalhados, não havendo uma correlação satisfatória.

Embora a teoria geral que explica a CCMI esteja bem desenvolvida na literatura internacional, a forma como as comunidades microbianas se relacionam com os complexos processos de corrosão, é ainda desconhecida. As técnicas de sequenciamento avançado revelam grupos microbianos inesperadas em abundância em algumas situações (Hernandez *et al.* 2002). No mais, muitas investigações microbiológicas estão restritas às estruturas fortemente corroídas e a situações em que o nível de corrosão não é conhecido (SUN, 2015).

Em comparação com as técnicas de medição do pH de superfície e de perda de massa, as análises microbiológicas são difíceis, demoradas, caras e não podem fornecer informações quantitativas, somente dados qualitativos do processo de corrosão (SUN, 2015).

# CAPÍTULO 4

---

## 4 ESTADO DA ARTE

### 4.1 A EVOLUÇÃO DO ESTUDO SOBRE A BIODETERIORAÇÃO

Até os dias atuais, o concreto foi amplamente estudado do ponto de vista químico, físico e mecânico, sendo analisado, dentre outros aspectos, a hidratação e composição do cimento, sua microestrutura, resistência química, comportamento e propriedades mecânicas. Entretanto, sob a ótica biológica, o concreto ainda é pouco compreendido, quando comparado aos outros aspectos citados.

Sabe-se que estruturas de concreto destinadas à coleta e tratamento de esgoto, por estarem expostas a ambientes agressivos, estão propensas ao desenvolvimento do processo da CCMI, o que gera consequências deletérias ao material, além de perdas ambientais e sociais. Desta forma, muitos estudos foram realizados ao redor do mundo no intuito de possibilitar uma melhor compreensão dos mecanismos da CCMI nestes ambientes, de forma a conseguir controlar tais efeitos danosos.

A princípio os pesquisadores acreditavam que a deterioração nas tubulações de esgoto ocorria unicamente por ataque de íons sulfatos ou outros componentes de enxofre. No início do século XX, Olmstead e Hamlin (1900) observaram o surgimento de uma massa pastosa esbranquiçada em parte de uma tubulação de esgoto, e atribuíram a isso um ataque químico por sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) produzido por BRS da espécie *Desulfovibrio* que existiam nos efluentes. Décadas depois, alguns estudos identificaram que a existência de  $H_2S$  no meio era a causa da produção de  $H_2SO_4$  e este a causa da corrosão do concreto (JAMES, 1917; BOWLUS e BANTA, 1932 *apud* VOLLERTSEN *et al.*, 2008).

Apenas em 1945, na Austrália, Parker pôde comprovar a correlação dos efeitos deletérios observados no concreto com um ataque por  $H_2SO_4$ , isolando, pela primeira vez, bactérias oxidantes de sulfato (BOE) do gênero *Thiobacillus* de uma superfície de concreto deteriorada, nomeando-as *Thiobacillus concretivorus*. O autor identificou que as BOE produziam  $H_2SO_4$  a partir da oxidação do  $H_2S$  gerado pelas BRS e que, portanto, a deterioração do concreto era decorrente do ataque ácido biogênico (derivado de ação biológica) (PARKER, 1945a). Ou seja, o concreto não

sofria apenas um ataque direto por  $H_2S$  ou por ácido puro, e sim uma corrosão microbiologicamente induzida (CCMI). Anos depois esta bactéria foi renomeada para *Thiobacillus thiooxidans* e em seguida para *Acidithiobacillus thiooxidans* (KELLY e WOOD, 2000).

Após a descoberta de Parker (1945a), muitos esforços foram direcionados para o entendimento de todo o processo da CCMI. Alguns grupos de pesquisa passaram a fazer simulações deste processo de corrosão em laboratório, não apenas para compreender o ataque puramente químico do  $H_2SO_4$ , mas focados também no viés microbiológico do processo. De acordo com Hondjuila Miokono (2013), criar simulações em laboratório passou a ser necessário pelo fato do processo de CCMI dentro das redes de esgoto ser um processo complexo e muito lento. Mori (1991) mostrou que a velocidade da CCMI em redes de esgoto reais varia de 1 a 5 mm por ano, sendo necessários muitos anos de observação para que fosse possível realizar uma comparação do desempenho de diferentes traços de concreto.

As pesquisas sobre a resistência do concreto à CCMI podem ser divididas em basicamente três grupos: ensaios químicos, ensaios biológicos e ensaios *in loco*. Monteny *et al.* (2000), realizou uma ampla revisão sobre estes ensaios já realizados por diversos grupos de pesquisas.

Em seus trabalhos, muitos pesquisadores identificaram que a CCMI nas tubulações de esgoto é muito mais severo do que ataque por ácido sulfúrico puramente químico realizado em laboratório (SCHMIDT *et al.*, 1997 apud VINCKE *et al.*, 1999; DE BELIE *et al.*, 2004; MONTENY *et al.*, 2000). Para eles, durante um ataque químico por  $H_2SO_4$ , a gipsita formada cria uma camada na superfície do concreto que funciona como uma barreira física impedindo a difusão dos íons nas reações do ataque, o que reduz a velocidade da deterioração. Por outro lado, na CCMI, a camada de gipsita cria um ambiente favorável para o desenvolvimento das BOE, produzindo  $H_2SO_4$  na frente de corrosão (DAVIS *et al.*, 1998). Por este motivo, os ensaios realizados em laboratório com ataque ácido não representam integralmente os efeitos provocados pela BOE sobre o concreto dentro das redes de esgoto.

Para se aproximar da realidade, muitas pesquisas utilizaram câmaras experimentais, a fim de simular, em laboratório, as condições *in loco*, conforme Figura 34. Estas câmaras permitiram acelerar de 8 para 24 a velocidade da CCMI das amostras em relação às que eram colocadas dentro das redes de saneamento (EHRICH *et al.*, 1999). Entretanto, por vários motivos, como as diferentes atmosferas e espécie de *Thiobacillus* que existem pelo mundo, este parâmetro é muito difícil de ser analisado, dificultando também a comparação entre as taxas de corrosão de ensaios laboratoriais com as encontradas *in loco* (VINCKE *et al.*, 1999). Ademais, mesmo nas câmaras de simulação, muitas vezes o processo de corrosão ainda demora anos para iniciar. Por exemplo, Sand *et al.* (1987) em seus experimentos, verificaram o início da corrosão das amostras de concreto somente após 6 anos de incubação.

Figura 34: Câmaras de simulação de CCMI em laboratório



Fonte: Sand *et al.* (1994)

Com o passar do tempo, os cientistas desenvolveram testes de simulação onde o ataque corrosivo pudesse ser acelerado. Sand *et al.* (1984 e 1987) conseguiram resultados de corrosão em um período de 270 dias, onde as amostras de concreto tiveram uma perda de massa de 5,8%. Schmidt *et al.* (1997) *apud* Vincke *et al.* (1999) determinaram a taxa de corrosão medindo a perda de massa das amostras. Em 5 meses de testes, as amostras mais resistentes tiveram perda de massa de 3 a 5% e as que sofreram danos mais severos tiveram perda de massa de 18 a 31%. Mori *et al.* (1992) também fizeram testes acelerados e conseguiram resultados de corrosão em 6 meses de experimentos. Neste caso foi medida a espessura das amostras, sendo identificado uma perda de espessura de 20 mm a cima do nível de

esgoto, o que representa uma taxa de perda de espessura de 6mm ao ano.

Na intenção de reproduzir em laboratório de forma ainda mais real as condições existentes das estruturas de saneamento, Vincke *et al.* (1999) elaboraram um novo procedimento de testes acelerados para análise de CCMI. O novo método consistia em submeter corpos de prova de concreto com 4 tipos de cimentos diferentes, sob condições ambientais controladas, a 4 ciclos de 17 dias de uma sequência de incubação em H<sub>2</sub>S, formação do biofilme e do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ataque por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, períodos de lavagem para remoção do concreto corroído e secagem por exposição a H<sub>2</sub>S. Foram observadas, estatisticamente, mudanças significativas entre as diferentes composições de concreto utilizadas, ao final dos três ciclos de 51 dias, um período curto comparado a outros protocolos. Em média os testes simularam uma corrosão de 5,7mm/ano, sendo identificadas perdas de massa e de espessura menores para as amostras com cimentos com polímeros.

Um dos maiores estudos sobre a CCMI in loco foi realizado por uma parceria entre pesquisadores da Universidade da Cidade do Cabo e a *Concrete Manufacturers Association*, na África do Sul, que criaram o chamado *Virginia Experimental Sewer* (ou sistema de esgoto experimental da Virginia), conhecido como um laboratório vivo. Nele, três tubulações de esgoto de 880 mm de diâmetro e 65 m de comprimento cada, com seções de diferentes misturas de concreto (ou seja, diferentes combinações de tipos de cimento e agregados) foram construídas, monitoradas e estudadas durante 20 anos. Além disto, amostras cilíndricas também foram expostas na estrutura para serem analisadas em laboratório (ALEXANDER *et al.*, 2011).

Segundo Molsieloa (2012), a operação do sistema teve início em 1988 e foi dividida em 4 fases de 5 anos. Em cada fase diferentes composições de concreto e medidas de prevenção com diversos revestimentos foram testados. Como exemplo pode-se citar seções de concretos com:

- Cimento Portland (CP) + agregados silicosos;
- Cimento Portland (CP) + agregados calcários;
- Cimentos Aluminato de Cálcio (CAC) + agregados silicosos;

- Fibrocimento;
- Revestimento de concreto de cimento Portland com polietileno de alta densidade;
- Revestimentos com poliuretano e epóxi.

De acordo com Goyns (2008), depois de 12 anos de deterioração, as seções com agregados sillicosos estavam a beira de um colapso. Para evitar isto, o esgoto foi desviado para que pudessem ser feito alguns reparos. Todavia, em algumas seções os 84 mm de espessura das paredes haviam desaparecido por completo, indicando uma corrosão de 7 mm por ano. A Figura 35 mostra fotos do “laboratório vivo” da Virgínia, sendo a primeira da fase 1 e a segunda na fase 2.

Figura 35: Seção do *Virginia Experimental Sewer*



Fonte: Goyns (2008)

Segundo Motsieloa (2012), as principais conclusões do estudo são citadas de forma resumida a seguir:

- O concreto com CAC apresentou uma melhor performance do que o concreto com cimento Portland, pela sua capacidade de neutralização do ácido e seu efeito nas colônias bacterianas;
- Foi identificada uma maior corrosão quando o fluxo diário de esgoto era maior, por este exercer um papel abrasivo na estrutura, expondo novas superfícies ao ataque;
- Houve grande variabilidade de perda de massa de todos os concretos nas três tubulações.

Muitos estudos foram também desenvolvidos com foco nos ensaios biológicos, a fim de identificar o papel dos microrganismos na CCMI, depois que Parker (1945a,b) isolou as bactérias gênero *Thiobacillus* pela primeira vez. Organismos como bactérias, fungos, algas, dentre outros foram identificados em amostras de concreto corroídos, envolvidos no metabolismo de diferentes compostos de enxofre para formar  $H_2SO_4$  (MILDE *et al.*, 1983; ISLANDER *et al.*, 1991; DAVIS *et al.*, 1998; GU *et al.*, 1998; NICA *et al.*, 2000; VINCKE *et al.*, 2001; SATOH, 2009).

Além dos ensaios químicos e biológicos, em laboratório e *in loco*, muitos pesquisadores desenvolveram estudos com modelagens matemáticas para previsão da taxa de corrosão do concreto (YUAN *et al.*, 2013; WELLS e MELCHERS, 2015). Segundo De Belie *et al.* (2004), em 1977, Pomeroy descreveu um modelo de deterioração do concreto em tubulações de esgoto e afirmou que as previsões sobre as taxas de deterioração do concreto podem ser ferramentas valiosas para a concepção e gestão das redes de esgoto. Em seu modelo, o autor descreveu as duas etapas principais da CCMI, ou seja, a produção de  $H_2S$  e seu desprendimento para a atmosfera, e sua oxidação para  $H_2SO_4$  pelo metabolismo de BOE, o qual ataca o concreto.

De Belie *et al.* (2004) citam ainda que outros autores também desenvolveram modelos matemáticos de previsão unicamente da geração de  $H_2S$  em sistemas de saneamento, devido aos diversos problemas com odor e toxicidade causados por este gás (THISTLETHWAYTE, 1972; BOON e LISTER, 1975; NILSEN *et al.*, 1998; DELGADO *et al.*, 1999) e outros desenvolveram modelos de previsão da segunda etapa da CCMI, ou seja, com foco no ataque do concreto por  $H_2SO_4$ , o qual está diretamente relacionado com as propriedades do material (BOHM *et al.*, 1998)

No Brasil, segundo Shirakawa (1994), o primeiro indício da presença de microrganismos em concretos brasileiros foi observado por Ribas Silva (1991) que encontrou vários tipos de microrganismos ao analisar a microestrutura de concretos coletados em Brasília. Porém, não foram elaboradas análises microbiológicas nas amostras, portanto não foi possível identificar se os microrganismos estavam participando do processo de deterioração. Shirakawa *et al.*, (1992) encontraram

bactérias heterotróficas, fungos e indicação para *Thiobacillus* e BRS em concreto deteriorado na cidade de São Paulo.

Segundo George *et al.* (2012), até 1995 os estudos sobre a biodeterioração eram limitados às estruturas dos sistemas de saneamento. Porém, diversas estruturas de concreto expostas a ambientes agressivos, como áreas industriais, regiões marinhas, estações nucleares, sistemas de petróleo e gás, dentre outras, também estão propensas ao desenvolvimento do processo da biodeterioração, o que gera consequências deletérias ao material, além de perdas ambientais e sociais.

O autor cita ainda que a maioria dos estudos sobre a CCMI é direcionada às tubulações de esgoto, sendo poucas pesquisas ligadas aos processos de corrosão nos demais elementos do sistema de saneamento como os tanques aerados (BARBOSA *et al.*, 2002), estruturas do tratamento primário (STUFFLEBEAN *et al.*, 2007), fossas sépticas e estações de bombeamento (SARICIMEN *et al.*, 2003), embora a CCMI também ocorra nestas estruturas, por também apresentarem as condições favoráveis para o seu desenvolvimento.

Mais recentemente, alguns pesquisadores realizaram artigos de estado da arte sobre a CCMI, como O'Connell *et al.* (2010); Hudon *et al.* (2011); SANCHEZ e ROSOWSKY (2008) e WEI *et al.* (2013), por exemplo, apresentando as várias abordagens de investigação desenvolvidas nessa área, com o intuito de melhor compreender o fenômeno da CCMI, fazer comparações entre os resultados obtidos pelos diferentes autores e discutir as estratégias empregadas nos ensaios, os modelos matemáticos de simulação e os avanços obtidos na área.

Na Figura 36 a seguir, é apresentada em uma linha do tempo mostrando de forma resumida a evolução das pesquisas destinadas à CCMI do concreto em estruturas de saneamento, citando os estudos mais relevantes, dentre os quais a autora pôde encontrar e ter acesso em sua pesquisa, dos autores com mais trabalhos publicados sobre o tema, desde 1900 até 2015.

Além da linha do tempo, no Anexo A é apresentado um quadro com diversos artigos, teses, dissertações e livros sobre a CCMI em estruturas de saneamento, em ordem cronológica, encontrados pela autora.

Figura 36: Linha do tempo dos principais estudos de CCMI no mundo

Figura 26: Linha do tempo dos estudos de CCMI no mundo

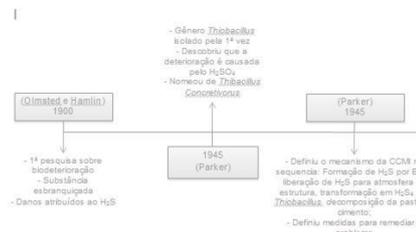
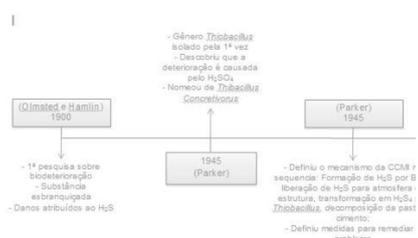


Figura 26: Linha do tempo dos estudos de CCMl no mundo



## 4.2 MÉTODOS DE PREVENÇÃO DA CCMI

Muitas tecnologias foram desenvolvidas no estudo da CCMI, visando prevenir de maneira eficaz a sua ocorrência em estruturas de saneamento. Tais tecnologias ajudam a mitigar a taxa de corrosão, seja por meio da prevenção do acúmulo de sulfetos na fase líquida, ou atenuando a liberação de H<sub>2</sub>S na fase gasosa para a atmosfera das estruturas, ou ainda protegendo a superfície do ataque ácido, com revestimentos diversos (REDNER *et al.*, 2004; VINCKE, 2002).

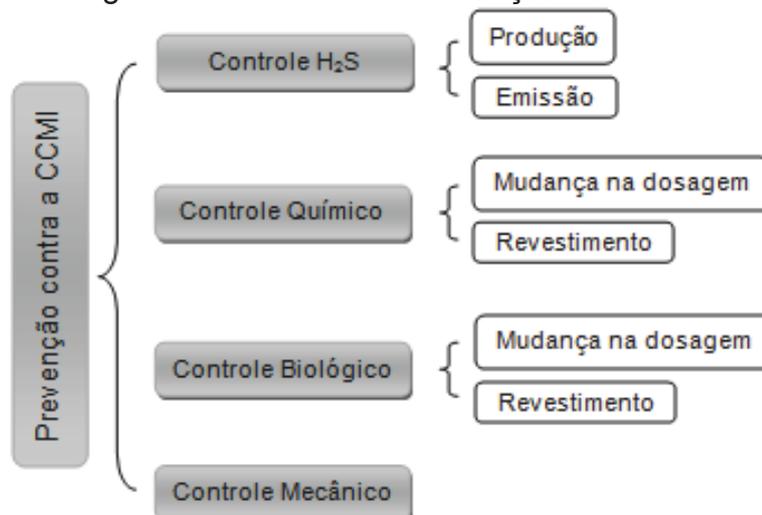
Zhang *et al.* (2008) realizaram uma revisão sobre as tecnologias químicas e biológicas existente para o controle da emissão de H<sub>2</sub>S em sistemas de esgoto. Para Cwalina (2008) os métodos mais comuns usados para proteção contra a CCMI incluem: modificação da dosagem do concreto, revestimentos com pinturas as quais podem ser aspergidas ou aplicadas com rolo na superfície do concreto, com o objetivo de aumentar a alcalinidade do material.

De Muyneck *et al.* (2009) separaram em 3 grupos os diversos métodos que têm sido mais utilizados para controlar a CCMI em sistemas de esgoto, são eles:

1. Controle da produção e emissão de H<sub>2</sub>S: Aplicação de tecnologias químicas, biológicas ou mecânicas que diminuam a quantidade de emissões de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S);
2. Controle do ataque químico: aplicação de aditivos, cimentos resistentes ao ataque ácido, revestimentos de proteção física que impeçam o ataque químico do concreto;
3. Controle da atividade microbiana: o uso de revestimentos antimicrobianos, de misturas que diminuam ou eliminem a atividade microbiana ou de biocidas.

Pomeroy (1974) cita ainda alguns métodos mecânicos de controle da CCMI. A Figura 37 mostra de forma resumida os diferentes métodos de controle existentes para prevenção da CCMI em estruturas de saneamento.

Figura 37: Métodos de Prevenção da CCMI

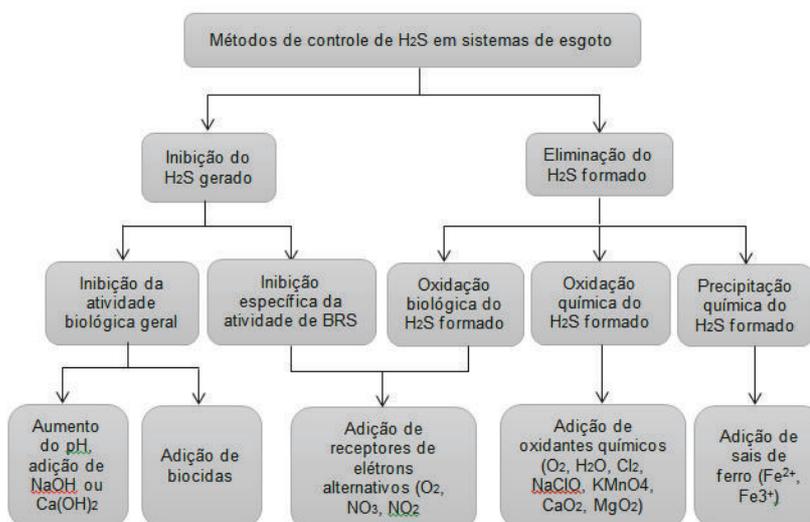


Fonte: A autora (2016)

#### 4.2.1 Controle da produção e emissão de H<sub>2</sub>S:

Uma das formas de prevenção da CCMI, segundo Zhang *et al.* (2008), é a diminuição da produção e da emissão de H<sub>2</sub>S no meio. A Figura 38 mostra de forma esquemática as possibilidades de controle da concentração de H<sub>2</sub>S em sistemas de esgoto, podendo ser tratamentos preventivos ou corretivos. O objetivo destas medidas é prevenir a CCMI atacando a sua causa, ou seja, a concentração de H<sub>2</sub>S no meio e não proteger a estruturas contra os efeitos do ataque (VINCKE, 2002).

Figura 38: Técnicas químicas e biológicas para controle de H<sub>2</sub>S



Fonte: Modificado de Zhang *et al.* (2008).

Como mostra a Figura 38, o controle de H<sub>2</sub>S pode ocorrer tanto na inibição de sua produção, seja na fase líquida ou gasosa, quanto na sua eliminação quando já existente. Os métodos de prevenção de acúmulo de H<sub>2</sub>S na fase líquida e sua transferência para a fase gasosa utilizam dosagens de produtos químicos no esgoto. Na literatura encontra-se estudos sobre: hidróxido de magnésio, hidróxido de sódio, sal de ferro, ácido nitroso livre, nitratos, oxigênio, peróxido de hidrogênio, ozônio, cloro e permanganato (SUN, 2015; PARK *et al.*, 2014).

O hidróxido de magnésio (MgOH), de sódio (NaOH) e de cálcio (CaOH) podem elevar o pH das águas residuais e reduzir a liberação de H<sub>2</sub>S gasoso para a atmosfera da rede (GANIGUE *et al.*, 2011). Com o pH elevado as BRS são parcialmente inibidas e produção de H<sub>2</sub>S diminui (GUTIERREZ *et al.*, 2014).

Já os sais de ferro podem precipitar o H<sub>2</sub>S no lodo de esgoto e os íons férricos, particularmente, podem oxidar o H<sub>2</sub>S e inibir significativamente as BRS (SUN *et al.*, 2015a). O ácido nitroso livre (conhecido na literatura internacional como *Free Nitrous Acid - FNA*) age como um inibidor de BRS evitando, assim, a produção de H<sub>2</sub>S. Concentrações entre 0,1 e 0,3 mg HNO<sub>2</sub>-N.L<sup>-1</sup>, com exposição de 6 a 24h reduz a variedade de bactérias anaeróbias em 65 a 75% (JIANG *et al.*, 2011a). Este efeito é elevado pela utilização combinada de peróxido de hidrogênio (JIANG *et al.*, 2011a.; JIANG *et al.*, 2011b.; JIANG *et al.*, 2013.; JIANG e YUAN, 2013). De forma similar a aplicação de oxigênio irá oxidar diretamente os sulfetos presentes do esgoto e inibir a proliferação de BRS (GUTIERREZ *et al.*, 2008; PARK *et al.*, 2014).

Muitos parâmetros podem inibir o metabolismo das BRS, como: as concentrações de oxigênio dissolvido maiores que 1,0 mg/L, temperatura fora da faixa de 25°C a 43°C ou pH abaixo de 5,5 ou acima de 9,0. Porém, esta inibição pode causar problemas no processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica e, por isso, deve ser avaliada com cuidado (HOLMER e STORKHOLM, 2001 *apud* DINIZ, 2015).

No que diz respeito à eliminação do H<sub>2</sub>S da atmosfera do esgoto, isto pode ser feito de duas formas, química ou biologicamente. Os processos biológicos são considerados como uma alternativa de baixo custo e alta eficiência, já que, uma

grande variedade de microrganismos pode oxidar e reduzir espécies de enxofre (ELSHAHEED *et al.*, 2003). Tal processo possui muitas vantagens como baixo custo de operação e menor consumo energético, além de poder ser operado a temperatura ambiente (PÉREZ e VILLA, 2004).

O H<sub>2</sub>S pode também ser eliminado empregando-se sistemas de aeração não catalisado quimicamente, utilizando-se cloro, ozônio, permanganato de potássio ou peróxido de hidrogênio, com produção de enxofre elementar, tiosulfato ou sulfato, dependendo do pH. Outros métodos considerados convenientes para remoção de sulfeto são: precipitação com íons metálicos. Dentre as desvantagens provenientes desses processos podem ser citadas o alto custo operacional e de manutenção, elevado consumo energético, consumo de substâncias químicas com possibilidade de formação de subprodutos tóxicos (POMEROY *et al.*, 1999).

Portanto, embora muitos dos métodos citados acima sejam comprovados e utilizados para reduzir de forma eficaz o acúmulo de H<sub>2</sub>S na fase líquida, eles também possuem algumas desvantagens. A maioria dos métodos são onerosos devido à necessidade de dosagem contínua de grandes quantidades de produtos químicos para os grandes volumes de águas residuais. Alguns produtos (por exemplo, os sais de ferro) podem resultar na formação de resíduos não desejados no meio ambiente. Além disto, alguns métodos não controlam adequadamente, à longo prazo, os níveis de H<sub>2</sub>S gasoso na parte aeróbica do esgoto (SUN, 2015).

#### **4.2.2 Controle do ataque químico**

O controle do ataque químico pode ser pela mudança na dosagem do concreto, o que vai conferir ao material maior resistência química, ou pela proteção física do mesmo, impedindo que ocorram as reações químicas entre os compostos da pasta de cimento e os produtos metabólitos das bactérias existentes no meio.

No que diz respeito às modificações da dosagem do concreto, Vincke *et al.* (2002) estudaram a influência da adição de polímero ao concreto na CCMI e descobriram que a sua presença na matriz de cimento leva à redução do tamanho dos poros, resultando na redução da permeabilidade do concreto, o que leva a uma diminuição

do ingresso de ácidos no material. Em muitos estudos a utilização de cimento de aluminato de cálcio (CAC) apresentou melhor desempenho na resistência ao ataque ácido comparado ao cimento Portland (SAND *et al.*, 1994; SCRIVENER *et al.*, 1999; BERNDT, 2011; SCHMIDT *et al.*, 1997 apud VINCKE *et al.*, 2002). Uma possível explicação está no fato dos aluminatos de cálcio possuírem maior estabilidade do que o hidróxido de cálcio, além de formarem um gel que bloqueia os poros do concreto impedindo o ingresso do ácido. Para Vincke (2002), porém, estes métodos funcionam melhor para o ataque ácido puro do que para o ataque de ácido biogênico. Além disto, estes cimentos especiais podem custar mais de cinco vezes o valor dos cimentos comuns. No caso dos cimentos com polímeros o custo adicional pode ser de 20 a 50% maior do que os materiais comuns.

No que concerne à utilização de revestimentos, Sydney *et al.* (1996) mostraram que a aplicação de uma camada de hidróxido de magnésio na superfície do concreto pode aumentar quimicamente o seu pH e, assim, inibir o metabolismo das bactérias oxidantes de enxofre (BOE). A superfície do concreto pode também ser protegida por uma camada chamada “camada de sacrifício”, por meio da implantação de revestimentos que impeçam o ataque químico ao concreto.

As desvantagens destes métodos incluem o uso de produtos químicos potencialmente nocivos e caros, o custo elevado do tratamento regular e a dificuldade de preparo da superfície de concreto para o revestimento (por exemplo, o revestimento com epóxi) (SUN, 2015).

Ao longo dos anos, uma ampla variedade de testes laboratoriais foi desenvolvida para a avaliação de métodos de controle do ataque químico e da atividade microbiana. Schmidt *et al.* (2007) no entanto, mostraram que uma elevada resistência ao ácido sulfúrico em testes químicos nem sempre implica numa elevada resistência contra a CCMI.

#### **4.2.3 Controle da atividade microbiana**

Assim como o controle do ataque químico, o controle da atividade microbiana envolve diversos métodos. A literatura mostra que podem ser utilizados tratamentos

físicos ou biológicos, como o uso de revestimentos ou substâncias biocidas que impeçam a ação de microrganismos.

Segundo De Muyneck *et al.* (2009), algumas falhas em revestimentos usados contra a CCMI, previamente testados em laboratório, quando aplicados em estruturas de saneamento de concreto reais, levaram à necessidade de desenvolvimento de novas abordagens que afetem diretamente a atividade microbiana, e não apenas o ataque químico. Os autores relatam o desempenho das superfícies de concreto que contenham revestimentos de fibras poliméricas antimicrobianas, revestimentos em epóxi ou metais zeolíticos na prevenção da CCMI. Foi testada também a eficácia dos tratamentos de superfície e aditivos comerciais, medida por meio de exposição química acelerada e simulações de testes microbiológicos (BERNDT, 2011; DE MUYNCK *et al.*, 2009). Os estudos mostraram que a melhor proteção à CCMI foi obtida utilizando revestimento em epóxi.

O efeito biocida dos revestimentos antimicrobianos foi quantificado por meio de testes de incubação em amostras de argamassa. A presença de compostos antimicrobianos resultou num decréscimo de 3-12 vezes da atividade bacteriana. A melhor proteção foi obtida com revestimentos de poliureia e de epóxi. As amostras permaneceram íntegras com 8 e 10 ciclos de ensaios microbiológicos, respectivamente (DE MUYNCK *et al.*, 2009).

Recentemente, um concreto antimicrobiano contendo metais zeolíticos com íons de prata e cobre foi introduzido no mercado japonês. De acordo com os testes realizados pelo fabricante, uma concentração de 1% de peso de cimento de metais zeolíticos é ideal para a inibição do crescimento das *Thiobacillus*.

O uso de superfícies antimicrobianas já foi já foi estudado na medicina, odontologia e na indústria alimentícia. Porém, para prevenção da CCMI os estudos destes recursos são relativamente novos. Yamanaka *et al.* (2002) conseguiram inibição da atividade microbiana, quando as culturas de *Thiobacillus* foram expostas ao concreto com adição de formiato de cálcio ( $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ ) na mistura, uma reação de ácido fórmico com sal de cálcio. Shook e Bell (1998) relataram sobre a eficácia de uma

emulsão de sal quaternário de amônio estabilizado em silicone, adicionado a uma mistura de concreto para inibir o crescimento de das *Thiobacillus*.

Em outros estudos foram adicionados inibidores ou biocidas no concreto para impedir a ação das BOE (YAMANAKA *et al.*, 2002). Alum *et al.* (2008) estudos diferentes formulações biocidas e descobriram que as misturas de concreto contendo 10% de ZnO foi muito eficaz.

#### **4.2.4 Controle Mecânico**

Pomeroy (1974) diz que a demanda de oxigênio é um fator determinante no que diz respeito à geração e liberação de H<sub>2</sub>S nas redes de esgoto.

A ventilação nas redes de saneamento tem as seguintes funções:

1. Aumentar a taxa de oxigênio da atmosfera das tubulações;
2. Remover a maior quantidade possível de H<sub>2</sub>S antes que este gás seja oxidado para H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;
3. Secar as superfícies expostas das tubulações, diminuindo a umidade necessária para o crescimento bacteriano;
4. Eliminar da toxicidade e odores da atmosfera do esgoto;

A ventilação, porém, pode aumentar o mau cheiro no ambiente. A remoção direta da camada de corrosão, por meio de lavagem também pode ser utilizada (ISLANDER *et al.*, 1991). Porém sua eficácia precisa ser melhor investigada, pois pode também dar espaço a novas superfícies para deterioração (SUN, 2015).

Pomeroy (1974) e ASCE (2001) citam também o projeto das tubulações e demais elementos das estruturas de saneamento como um fator importante na prevenção da CCMI. Como já mencionado, os períodos de detenção hidráulica e o fluxo de esgoto são determinantes para que haja uma maior ou menor corrosão das estruturas. O projeto adequado das redes de esgoto visa garantir um ambiente menos favorável para a emissão de H<sub>2</sub>S, para a colonização e metabolismo microbiológicos, de forma que diminua o processo de deterioração destas estruturas.

No Quadro 5 são apresentados, de uma forma sistematizada, os métodos de controle e prevenção da CCMI em estruturas de saneamento, propostas por diversas pesquisas. A legenda indica se o método tem um desempenho bom, regular ou ruim, com as cores verde, amarelo e vermelho, respectivamente, em relação aos parâmetros da resistência, dos custos financeiros, facilidade de aplicação, sustentabilidade e durabilidade.

Quadro 5: Sistematização dos métodos de controle e prevenção de CCMI em estruturas de saneamento

		Prevenção da produção de H <sub>2</sub> S					
Controle H <sub>2</sub> S	Método	Resistência	Aplicação	Sustentabilidade	Durabilidade	Custo	
	1	Hidróxido de Magnésio, Sódio e Cálcio					
	2	Ácido nítrico					
	3	Aplicação de oxigênio					
	Eliminação do H <sub>2</sub> S						
	Método	Resistência	Aplicação	Sustentabilidade	Durabilidade	Custo	
	1	Controle químico					
	2	Controle biológico					
			Revestimento				
	Controle Químico	Método	Resistência	Aplicação	Sustentabilidade	Durabilidade	Custo
1		Aplicação de Hidróxido de Magnésio					
2		Camadas de sacrifício					
Modificação na dosagem							
Método		Resistência	Aplicação	Sustentabilidade	Durabilidade	Custo	
1		Polímeros					
2		Pozolanas					
3		Cimento de aluminato de cálcio (CAC)					
4		Cimentos resistentes a sulfatos (RS)					

		Revestimentos Biocidas						
		Método	Resistência	Aplicação	Sustentabilidade	Durabilidade	Custo	
Controle Biológico	1	Poliuréia						
	2	Epóxi						
	Adições ao concreto							
	1	Formiato de cálcio						
2	Sal quaternário de amônio							
3	Metais zeolíticos com íons de prata e cobre							
Controle Mecânico	Ações mecânicas							
			Método	Resistência	Aplicação	Sustentabilidade	Durabilidade	Custo
	1	Ventilação						
	2	Projeto						
3	Lavagem							

Fonte: A autora (2016)

Legenda:

	Bom
	Regular
	Ruim

#### 4.1 ARGUMENTAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE A CCMI

Muitas estações de tratamento, caixas de visita, fossas sépticas e tubulações entraram em colapso devido à perda da integridade estrutural causada pelo ataque de  $H_2SO_4$  biogênico. Como visto, o  $H_2SO_4$  ataca a matriz do concreto, que contém compostos hidratados do concreto como o hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formando produtos expansivos (como etringita e gipsita)

muito deletérios ao material, o que significa um grave problema econômico, ambiental e social para muitos países.

Atualmente, existem muitas linhas de pesquisa para investigação da CCMI do concreto, com o objetivo de mitigar os efeitos deletérios deste fenômeno: estudos sobre os processos biológicos envolvidos na CCMI, com referência ao papel das BRS e BOE, estudos ligados aos efeitos químicos do  $H_2S$  e  $H_2SO_4$  sobre as misturas de concreto, metodologias de pesquisa em laboratório com simulação de ataque em câmaras de deterioração, modelagem matemática para simulação da deterioração do concreto, dentre outras.

Analisando a produção científica sobre a CCMI, países como os EUA, Alemanha, Austrália, Japão, Índia e França são os que têm maior número de grupos de pesquisas com trabalhos sobre o tema. Porém não foi possível elaborar um levantamento quantitativo desta produção científica, por não ser possível ter acesso a todos os trabalhos realizados. No Brasil, existe uma variedade de estudos sobre biodeterioração de materiais de construção de uma forma geral, que abordam a deterioração por fungos e algas ou relacionados a edificações históricas, além da corrosão microbiologicamente induzida em estruturas metálicas. Porém são poucos os autores que dedicaram suas pesquisas ao estudo específico da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) em estruturas de saneamento.

Apesar do vasto conhecimento adquirido nos últimos anos sobre a CCMI em estruturas de saneamento, os mecanismos fundamentais deste fenômeno não foram ainda totalmente definidos. Muitas pesquisas dependem largamente de evidências empíricas. A natureza complexa de testes microbiológicos e a utilização de materiais perigosos impediram o desenvolvimento de métodos de ensaio convenientes e replicáveis que reproduzam a CCMI em laboratório, uma vez que são difíceis, demorados e muito onerosos na maioria das vezes. Isto levou ao desenvolvimento de métodos de teste simplificados e acelerados que podem não capturar com precisão os mecanismos dos danos causados pela CCMI. Além disso, a falta de metodologias de ensaio normalizadas para a avaliação da resistência do concreto à corrosão biogênica resulta em constatações inconsistentes e impossibilita a comparação direta entre as análises de laboratório (HOUSE e WEISS, 2014).

Vale ressaltar que, embora existam muitas questões não definidas sobre os complexos processos envolvendo a CCMI, a literatura mostra os diversos fatores que influenciam a ocorrência do fenômeno, os quais podem ser intrínsecos aos materiais ou relacionados ao ambiente externo, como pode ser resumido a seguir:

- A composição e propriedades do concreto utilizado na construção das estruturas de saneamento, como tipo de cimento, agregado, relação a/c, porosidade do material, adições e tratamentos com biocidas nas misturas;
- A composição do efluente (influencia no metabolismo das BRS e BOE);
- As condições ambientais do meio (temperatura, umidade, pH do esgoto e da superfície imersa da estrutura);
- Os efeitos mecânicos que influenciam na taxa de oxigênio disponível e na velocidade de emissão do H<sub>2</sub>S;
- A produção mais ou menos importante de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pelas BOE;

Tais conhecimentos podem auxiliar no controle e prevenção da CCMI, garantindo maior durabilidade e vida útil às estruturas. Como visto no Quadro 5 existem diversos mecanismos de prevenção da CCMI nas estruturas de saneamento, seja por meio da eliminação ou inibição da formação de H<sub>2</sub>S, seja pelo controle químico ou biológico, ou pelo controle mecânico. Cada técnica possui vantagens e desvantagens em sua utilização, em relação às questões financeiras, de durabilidade, de facilidade de aplicação, resistência ou sustentabilidade. O entendimento dos mecanismos da CCMI proporciona uma melhor especificação da técnica a ser utilizada em cada estrutura.

Em suma, pode-se concluir, a partir do Quadro 5, que a maneira mais eficaz de se evitar a ocorrência da CCMI nas estruturas de concreto é por meio de um projeto bem feito e bem executado. Na fase de projeto da estrutura é possível prever as corretas inclinações das tubulações e velocidade do fluxo de esgoto, de modo a evitar uma grande detenção hidráulica e o acúmulo de lodo no fundo da estrutura. Além disto, é possível projetar estruturas que garantam a ventilação das redes, bem como fazer a especificação dos materiais, lançando mão de tecnologias avançadas, seja para a mistura do concreto ou para o revestimento do mesmo, que possam diminuir a corrosão causada por microrganismos.

# CAPÍTULO 5

---

## 5 ESTUDO DE CASO

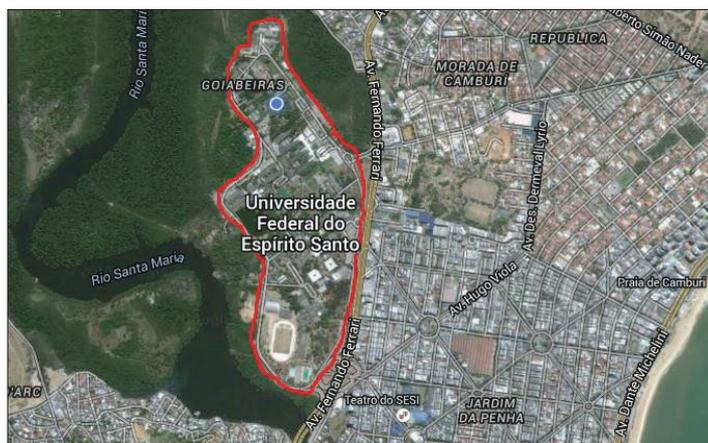
A seguir são apresentados dois estudos de caso realizados nesta pesquisa. O primeiro estudo de caso compreende uma série de vistorias feitas em 38 fossas sépticas do campus de Goiabeiras da UFES. O segundo estudo de caso foi realizado em duas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), uma em Vitória e outra na Serra. A fim de tornar o estudo mais claro e organizado foi utilizada durante as vistorias em campo uma Ficha de Inspeção, apresentada no Anexo B – Ficha de Inspeção. Além disso, foi elaborado, a cada vistoria, um Relatório Parcial de Inspeção, o qual contribuiu para a compilação dos dados levantados.

### 5.1 ESTUDO DE CASO 1: UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

O estudo de caso 1 foi realizado na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado no bairro Goiabeiras em Vitória – ES, identificada na imagem de satélite conforme Figura 39. A UFES foi inaugurada em 5 de maio de 1954 e possui uma área com certo de 1,5 milhão de metros quadrados (UFES, 2016).

A escolha do local do estudo de caso se deu pela facilidade de acesso às fossas, com devida autorização da Prefeitura Universitária e disponibilidade de liberação de um funcionário para auxílio nas inspeções. Além disto, o campus possui uma quantidade grande de fossas, o que permitiu um estudo mais abrangente.

Figura 39: Imagem de Satélite delimitando a área do estudo de caso na UFES

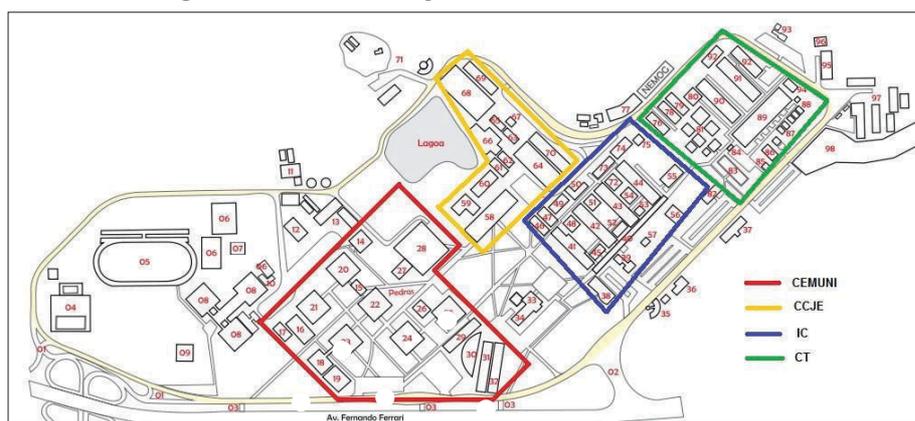


Fonte: Google Earth, 2016

As estruturas de saneamento denominadas fossas sépticas foram utilizadas para este estudo de caso. Fossas sépticas são unidades de tratamento primário nos esgotos domésticos, onde ocorre a separação e transformação de matéria sólida contida no esgoto. Nessas fossas, os esgotos sofrem a ação bacteriana e a parte sólida (lodo) é depositada no fundo, enquanto que na superfície forma-se uma camada de espuma, constituída de substâncias insolúveis mais leves. A fase líquida segue para o sumidouro ou para as valas de infiltração (FUNASA, 2014).

Foram vistoriadas fossas de quatro centros da UFES: CEMUNI (Célula Modular Universitária), CCJE (Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas), IC (Ilha do Cercado), e CT (Centro Tecnológico), identificados no mapa conforme Figura 40. Não foi possível analisar todas as fossas de todos os prédios, devido a fatores como: dificuldades de acesso, impossibilidade de abertura das tampas ou pela não identificação da fossa conforme o projeto. No CEMUNI foram analisadas 23 fossas, no CCJE foram analisadas 3 fossas, no IC foram analisadas 3 fossas e no CT foram analisadas 9 fossas, sendo um total de 38 fossas vistoriadas. Para este estudo de caso foi necessário utilizar um pé de cabra para abertura das fossas e aparelho fotográfico para registro das manifestações patológicas.

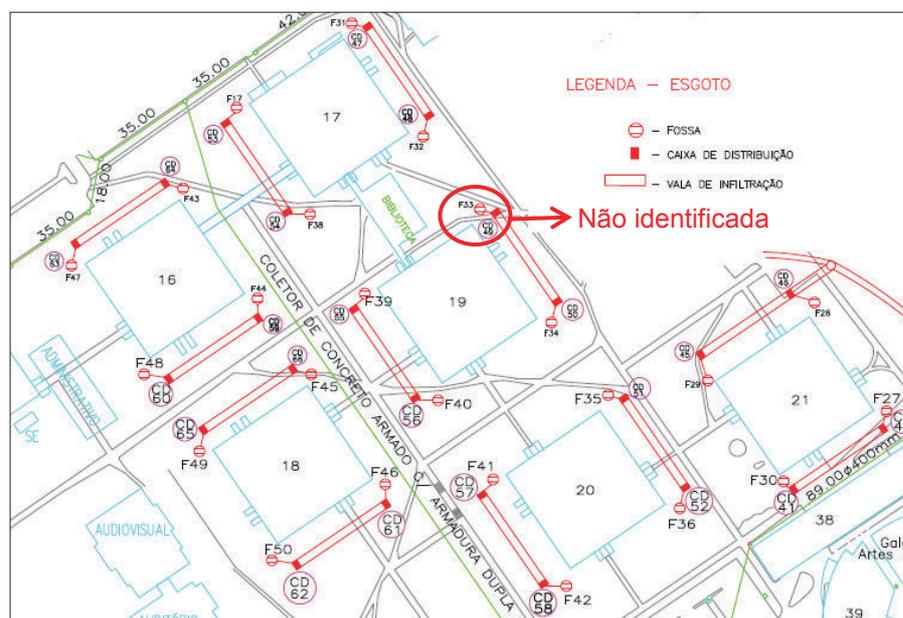
Figura 40: Delimitação dos Centros da UFES



Fonte: Adaptado de UFES, 2016

O primeiro centro vistoriado foi o CEMUNI. Os prédios datam da década de 60. As fossas estão distribuídas conforme a planta de drenagem da Figura 41. Ao todo são 6 prédios, com 4 fossas em cada, num total de 24 fossas, sendo que 1 não foi localizada conforme projeto.

Figura 41: Planta de drenagem – CEMUNI



Fonte: Planta da rede de drenagem geral - UFES, 2006

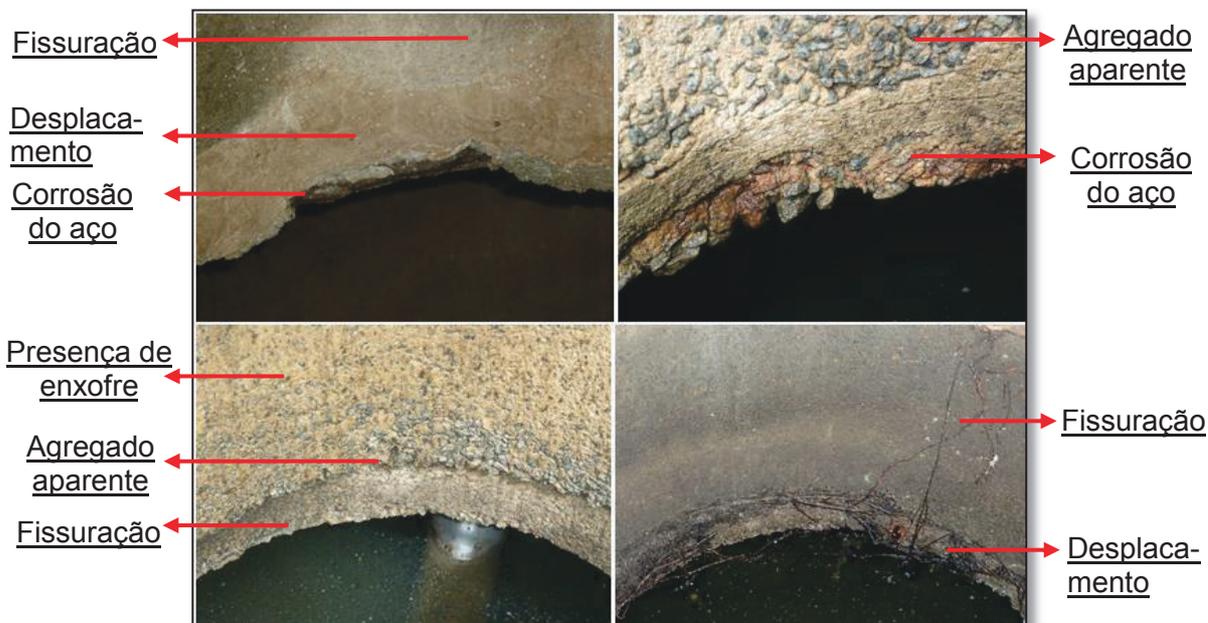
A Figura 42 mostra a deterioração de 4 das 23 fossas analisadas. Foi constatado que 20 fossas apresentaram forte odor de  $H_2S$  (característico de ovo podre), e deterioração avançada da estrutura. Foram identificadas inúmeras manifestações patológicas nas estruturas inspecionadas, como fissuração, perda de cobrimento do concreto, corrosão de armadura e deslocamento do concreto.

Em 100% das estruturas foi possível identificar a segregação do agregado da pasta de cimento, sendo que em alguns casos, o agregado se desprendia com facilidade da estrutura. Este desprendimento foi percebido ao realizar pequenas batidas com o auxílio do pé de cabra, em alguns pontos, poucas batidas eram suficientes para desagregação e em outros pontos não ocorreu o desprendimento. As manchas amareladas da superfície do concreto, em posições não padronizadas, foram observadas em grande parte das fossas, evidenciando a presença de enxofre no meio. Foi possível notar também um elevado grau de porosidade do concreto, identificado ao se observar o material a uma curta distância, o qual possuía características rugosas e vazios aparentes.

O diagnóstico das fissuras observadas não é preciso, visto que não foram realizados ensaios complementares, mas pode-se destacar algumas possíveis causas como:

biodeterioração, fissuração por produtos expansivos devido ao ataque ácido ou sulfático, desprendimento do concreto pela expansão das armaduras, dentre outras.

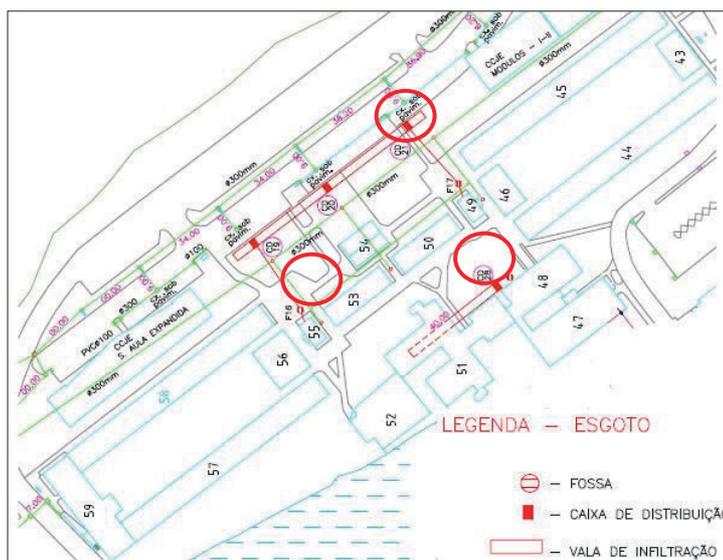
Figura 42: Fotos de 4 fossas do CEMUNI



Fonte: A autora (2016)

A segunda vistoria foi realizada no CCJE. A construção dos prédios data da década de 60. As fossas estão distribuídas conforme a planta de drenagem da Figura 43. Ao todo são 16 prédios, e apenas 3 fossas foram localizadas conforme o projeto.

Figura 43: Planta de drenagem - CCJE



Fonte: Planta da rede de drenagem geral - UFES, 2006

A Figura 44 mostra o estado de deterioração das 3 fossas. Todas apresentaram forte odor de  $H_2S$  e severa deterioração da estrutura. Os problemas encontrados foram a perda de cobrimento, agregados aparentes, corrosão da armadura e manchamento. O agregado aparente é uma situação típica de CCMI, pois mostra que houve corrosão por ácido biogênico. Já a corrosão da armadura pode ter sido causada pela exposição ao meio, em função da corrosão do concreto, ou devido à entrada de agentes agressivos como cloretos, sulfatos, ácidos, dentre outros.

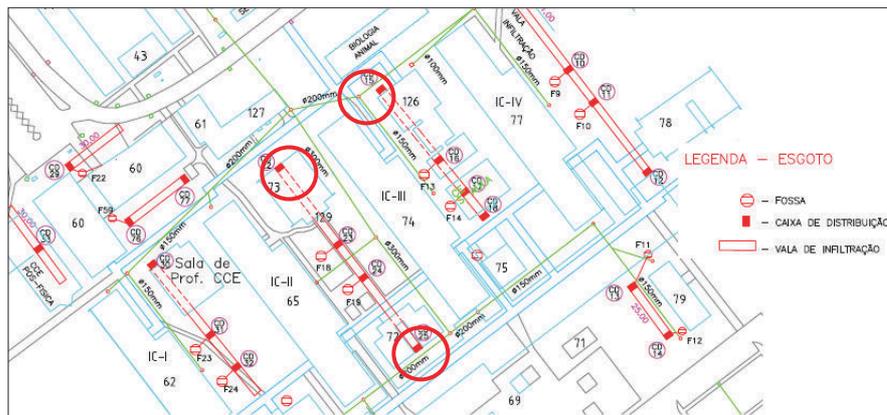
Observou-se também uma camada esbranquiçada na superfície do concreto, no perímetro da fossa, acima do nível do esgoto. Esta massa esbranquiçada que se depositou sobre a superfície, tem características quebradiças e granulometria fina, indica uma provável formação de  $H_2SO_4$  por BOE no local. Foi possível identificar também manchas amareladas, o que pode indicar a existência de enxofre no meio.



Fonte: A autora (2016)

A terceira vistoria foi realizada no IC que é um conjunto de centros como o CCHN (Centro de Ciências Humanas e Naturais), CCE (Centro de Ciências Exatas) e CE (Centro de Educação) e teve prédios construídos na década de 60 e 70. Algumas fossas foram refeitas e datam da década de 70. Elas estão distribuídas conforme a planta de drenagem da Figura 45. Ao todo são 19 prédios, mas apenas 3 fossas foram localizadas conforme o projeto.

Figura 45: Planta de drenagem – IC



Fonte: Planta da rede de drenagem geral - UFES, 2006

A Figura 46 mostra a deterioração das 3 fossas. Todas apresentaram forte odor de  $H_2S$  e deterioração avançada da estrutura. As manifestações patológicas encontradas foram fissuras, perda de cobertura do concreto, corrosão da armadura e manchamento, além da presença de substância esbranquiçada em menor quantidade. O concreto apresentava alta porosidade e fragilidade, podendo ser desintegrado facilmente. O agregado aparente e o aspecto poroso do concreto foram as manifestações patológicas mais observadas nestas fossas.

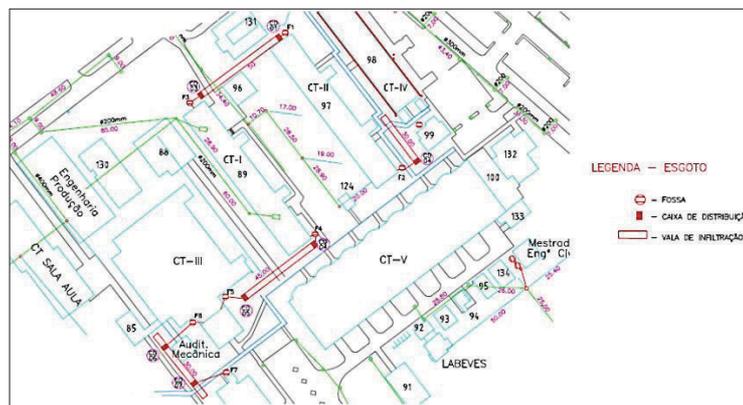
Figura 46: Fotos de 3 fossas diferentes do IC



Fonte: A autora (2016)

Por fim, foram realizadas as vistorias no CT (Centro Tecnológico). Os prédios datam dos anos 70. As fossas estão distribuídas conforme a planta da Figura 47. Ao todo são 15 prédios, sendo que 9 fossas foram localizadas conforme o projeto.

Figura 47: Planta de drenagem - CT



Fonte: Planta da rede de drenagem geral - UFES, 2006

Em 7 fossas analisadas, foi identificado forte odor de  $H_2S$  e deterioração. Em uma das fossas foi identificado o crescimento de uma árvore. Isto pode contribuir para o aumento da fissuração e conseqüente aumento do ingresso de agentes agressivos. As manifestações patológicas encontradas foram: perda de cobertura, corrosão da armadura, presença de substância esbranquiçada, fissuração, bolor e manchamento. Em algumas fossas evidenciava a presença de enxofre, devido a camada amarelada na superfície. A Figura 48 mostra a deterioração em 4 fossas.

Figura 48: Fotos de 4 fossas diferentes do CT



Fonte: A autora (2016)

### 5.1.1 Considerações sobre as inspeções do estudo de caso 1

Após a realização das inspeções e registros fotográficos das fossas sépticas da UFES, foi possível estabelecer as seguintes considerações:

- O local escolhido para o estudo de caso, por ser uma universidade e possuir uma população flutuante, com paradas aos fins de semana e férias escolares, possui um esgoto mais diluído do que o esgoto doméstico coletado nas cidades. Isto provavelmente explica o fato de nem todas fossas apresentarem forte odor de  $H_2S$  e deterioração em estágio avançado, como era esperado por serem estruturas muito antigas e que não possuem manutenções periódicas;
- A percepção de forte odor de  $H_2S$  contribui para a hipótese da presença de BRS em abundância no efluente. Além disto, foi possível correlacionar o odor com uma maior ou menor deterioração da estrutura. As fossas cujo odor era mais forte, a deterioração era mais acentuada. Ao passo que as fossas que se encontravam em melhor estado, não apresentavam muito cheiro do gás. A identificação de superfícies com coloração amarelada corrobora a hipótese de existência de enxofre, elemento fundamental para o metabolismo das BRS na produção de  $H_2S$ . A coloração amarelada era mais acentuada em locais onde o odor era mais intenso.
- Inúmeras manifestações patológicas foram observadas nas estruturas inspecionadas. As principais foram: desagregação do agregado graúdo, fissuração, deslocamento do concreto, manchamento e corrosão das armaduras.

### 5.2 ESTUDO DE CASO 2: ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) DA CESAN

O segundo estudo de caso foi realizado em duas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN). A primeira vistoria foi na ETE Camburi, em Vitória, e a segunda na ETE Feu Rosa, no município da Serra.

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é a unidade operacional do sistema de esgotamento sanitário, o qual, por meio de processos físicos, químicos e biológicos, remove as cargas poluentes do esgoto, devolvendo ao meio um efluente tratado, em conformidade com os padrões de exigência da legislação ambiental.

A CESAN é uma empresa capixaba, criada em 1967, cujo trabalho consiste na captação, no tratamento e na distribuição de água e na coleta e no tratamento de esgoto, além da realização de estudos, projetos e execução de obras relativas a novas instalações e ampliação de redes de água e esgoto. A ETE Camburi é administrada e operada pela própria CESAN. Já a ETE Feu Rosa é operada pela concessionária Serra Ambiental, empresa responsável pela coleta e tratamento do esgotamento sanitário do município da Serra, conforme contrato de concessão PPP (parceira público-privada) firmado em 2015 entre Cesan, Prefeitura Municipal e Serra Ambiental, pelos próximos 30 anos (CESAN, 2015).

### 5.2.1 ETE Camburi

A ETE Camburi, mostrada na Figura 49 possui tratamento do tipo Lagoa de Estabilização, sendo uma lagoa aerada e duas lagoas facultativas. Este tratamento é um processo simples e natural, cujo objetivo principal é a remoção da matéria orgânica do afluente. Antes de chegar à lagoa, o esgoto bruto passa por uma caixa de chegada, seguindo depois para o tratamento preliminar, o qual consiste no desarenador (para remoção da areia por meio da decantação) e gradeamento (para remoção de sólidos grosseiros por meio de grades que retêm o material).

Figura 49: Imagem aérea ETE Camburi



Fonte: A autora (2016)

Segundo informações da CESAN, em 2009, ocorreu um colapso da laje de cobertura da caixa de chegada do esgoto, conforme mostra a Figura 50. A caixa faz parte do sistema preliminar de tratamento do esgoto, é o local pelo o qual chega todo o afluente coletado nas vias. As causas do acidente não foram investigadas. Entretanto, acredita-se que o acidente tenha ocorrido devido a uma grande quantidade de  $H_2S$  confinado no local, o que pode ter sido transformado em ácido sulfúrico por bactérias oxidantes de enxofre (BOE) presentes na superfície da laje, gerando expansão e deterioração do material, até o colapso completo.

Nesta ETE o odor de  $H_2S$  é altamente elevado em toda área da estação, em alguns momentos causando desconforto aos olhos e na respiração.

Figura 50: Caixa de chegada em colapso



Fonte: A autora (2016)

O interior da caixa foi vistoriado pela parte superior da mesma, com o auxílio de uma escada. A Figura 51 mostra o estado bastante elevado de deterioração da estrutura. É possível identificar parte da laje que colapsou e apresenta agregado aparente, substância esbranquiçada e manchas amareladas. Na parte abaixo da laje, próximo ao fluxo de esgoto, se observa as mesmas manifestações patológicas percebidas na laje, além de corrosão da armadura e deslocamento de concreto. É importante destacar a quantidade abundante de massa esbranquiçada em todo interior da caixa e na parte inferior da laje, a qual se desprendia facilmente. Isto reflete a fragilidade do concreto neste local, sendo um indicativo de CCMI.

Figura 51: Interior da caixa de chegada



Fonte: A autora (2016)

A Figura 52 mostra o desarenador da ETE, o qual apresentava igualmente um grau elevado de deterioração. O desarenador também faz parte do tratamento preliminar e é o local onde a areia presente no esgoto sofre decantação antes de seguir para o gradeamento, local em que são coletados os maiores sólidos.

Figura 52: Desarenador da ETE Camburi



Fonte: A autora (2016)

Os detalhes dos danos nas estruturas do desarenador são apresentados na Figura 53. Apesar de no local do desarenador não haver aprisionamento de  $H_2S$ , os danos encontrados podem também serem atribuídos à CCMI. As manifestações patológicas encontradas foram substâncias esbranquiçadas, em menor quantidade, porosidade e agregado aparente. As fissuras e o deslocamento observados nas paredes do desarenador podem ter causas não associadas à biodeterioração.

Figura 53: Detalhe mostrando a deterioração do desarenador



Fonte: A autora (2016)

### 5.2.2 ETE Feu Rosa

A ETE Feu Rosa possui tratamento anaeróbico, com dois reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) conforme Figura 54. A vistoria teve o auxílio de dois funcionários da empresa Serra Ambiental, para ser possível o acesso aos reatores.

Figura 54: Reatores 1 e 2 de Feu Rosa



Fonte: A autora (2016)

O reator 1 foi o primeiro a ser vistoriado. A Figura 55 mostra o detalhe da parte superior do reator, após a tampa ser retirada. É possível identificar um estágio avançado de deterioração neste reator, onde existe principalmente grande quantidade de agregado aparente e substâncias esbranquiçadas, principais

manifestações patológicas visíveis típicas de CCMI. Observou-se ainda que o material apresentava porosidade elevada e o local tinha forte odor de H<sub>2</sub>S.

Figura 55: Imagens do Reator 1



Fonte: A autora (2016)

Em seguida, o reator 2 foi vistoriado. A Figura 56 mostra, como no reator 1, um grau avançado de deterioração no reator 2. Além das manifestações patológicas observadas no reator 1, percebe-se ainda o deslocamento do concreto na superfície superior do reator.

Figura 56: Imagens do Reator 2



Fonte: A autora (2016)

As Figura 57 e Figura 58 mostram demais elementos do processo preliminar do tratamento de esgoto, como o desarenador e gradeamento, os quais também apresentavam deterioração.

Figura 57: Tratamento preliminar ETE de Feu Rosa



Fonte: A autora (2016)

Figura 58: Desarenador ETE de Feu Rosa



Fonte: A autora (2016)

### 5.2.3 Considerações sobre as inspeções do estudo de caso 2

- Foi observada deterioração não apenas nos reatores, mas também nas estruturas que compõe o tratamento preliminar do sistema.

- O colapso da laje da caixa de chegada de efluente na ETE Camburi coloca em evidência o grave problema que envolve o processo da CCMI em estruturas de saneamento. Apesar de não terem sido realizados ensaios para identificar com precisão as causas do acidente, as características da estrutura remanescente, após o colapso, indicam que o problema pode ter ocorrido devido ao ataque de ácido sulfúrico biogênico ao concreto. Tal ataque causou fissuras, corrosão e deslocamentos no concreto de tal forma, que, ao longo do tempo, provocou danos irreparáveis;
- O odor elevado de  $H_2S$  nas ETE pôde ser correlacionado com a também elevada deterioração das estruturas. O forte odor pode ser explicado pelas características específicas do afluente que chega até as estações, as quais recebem o esgoto de várias áreas das cidades. Desta forma, o esgoto nestes locais, apresenta grande concentração de matérias orgânica, enxofre e íons sulfatos.

### 5.3 ARGUMENTAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso realizados nesta pesquisa foram feitos como um complemento ao trabalho de revisão bibliográfica sobre a corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI), no intuito de visualizar na prática a ocorrência desta biodeterioração do concreto *in loco*. Para tanto foi feito um levantamento fotográfico de diferentes estruturas ligadas ao sistema de saneamento que estivessem sofrendo o ataque de microrganismos.

Seria importante, entretanto, lançar mão de ensaios laboratoriais para que pudesse ser feito um diagnóstico mais preciso sobre as reais causas e consequências dos danos observados nas estruturas. Tais ensaios poderiam comprovar a presença de BOE no local, a formação de  $H_2SO_4$ , de produtos expansivos do tipo etringita, thaumasita ou gipsita secundárias, quantificar a presença de  $H_2S$ , avaliar o pH do efluente e da superfície do concreto, dentre outros parâmetros.

Um dos fatores limitantes para a realização dos ensaios foi a ausência de informações sobre as propriedades do concreto das estruturas estudadas, como fck, relação a/c, tipo de cimento, dosagem do concreto, detalhes sobre os dados de

concretagem, métodos e técnicas construtivas utilizados, além de informações sobre a etapa de utilização das estruturas, como possíveis manutenções e modificações, colapsos ou imprevistos que possam ter causado manifestações patológicas, uma vez que são estruturas antigas e já não é possível ter acesso a tais dados.

De todo modo, os estudos de caso realizados mostraram que as fossas e estações de tratamento de esgoto vistoriadas apresentavam importantes indícios da ocorrência de CCMI, quando é feita uma comparação com o que relata a literatura. Durante as vistorias, observou-se uma padronização das manifestações patológicas presentes na maioria dos elementos analisados. A presença de forte odor de  $H_2S$ , superfícies esbranquiçadas do concreto, manchas amareladas, fissuração, corrosão das armaduras, dentre outras manifestações patológicas corroboram a hipótese que de fato as estruturas estão sofrendo a ação da microbiológica.

Foi possível observar uma deterioração mais acentuada nas ETE vistoriadas em relação às fossas sépticas do campus da UFES. Isto pode estar ligado às diferentes características do esgoto nos dois locais. O esgoto da UFES encontra-se em sua forma mais diluída, pelo fato da universidade possuir uma população flutuante, com paradas nos fins de semana e férias escolares. O que faz com que o esgoto possua menos matéria orgânica

A presença constante de manchas amareladas foi observada na maioria das estruturas vistoriadas. Parker (1945b), Islander *et al.* (1991) e Vollertsen *et al.* (2008), também observaram em suas pesquisas uma mudança de coloração de cinza para amarelo no concreto, sugerindo um acúmulo de quantidades significativas de enxofre elementar na superfície do material. Segundo Pomeroy (1999), se não houver umidade condensada nas paredes da estrutura, não haverá a produção de  $H_2SO_4$ . Além disto, se a superfície não for reativa com o ácido e houver muita produção de  $H_2SO_4$ , o mesmo irá se acumular sobre o material e a formação de ácido será interrompida. Assim, o  $H_2S$  é então oxidado para enxofre, o qual se deposita formando uma camada amarelo pálido. Quando as condições voltam a ficar favoráveis, as bactérias oxidam este enxofre e formam mais  $H_2SO_4$ .

Outra manifestação patológica observada nas vistorias foi à perda de massa de concreto, devido a visualização de áreas com agregado aparente e sem cobrimento. O Quadro 6 mostra vários estudos que observaram a perda de massa devido à CCMI em estruturas de saneamento.

Quadro 6 - Diferentes pesquisas mostrando perda de massa em materiais cimentícios

Pesquisadores	Perda de Massa (mm/ano)	Material
US EPA, 1991	2,5 – 10	Concreto
Morton <i>et al.</i> , 1991	2, 7	Concreto
Mori <i>et al.</i> , 1992	4, 3 – 4, 7	Concreto
Ismail <i>et al.</i> , 1993	2 – 4	Argamassa
Davis <i>et al.</i> , 1998	3, 1	Concreto
Monteny <i>et al.</i> , 2000	1,0 – 1,3	Argamassa
Vincke <i>et al.</i> , 2002	1,1 – 1,8	Concreto

Fonte: Adaptado de Herisson (2012)

A maior parte dos artigos sobre a CCMI em redes de esgoto está relacionada à análise do fenômeno ocorrendo em tubulações das redes. Contudo, como não seria possível vistoriar as tubulações da UFES, tampouco as das redes de coleta de esgoto da CESAN, pela impossibilidade de acesso, optou-se pela vistoria das fossas sépticas e ETE para os estudos de caso. Entretanto, tendo em vista o estado de deterioração observado nas estruturas vistoriadas, pressupõe-se que as tubulações ao longo das redes de esgoto estejam em um nível ainda mais avançado de deterioração, por apresentarem maior tempo de detenção hidráulica, menor ventilação e maior concentração de H<sub>2</sub>S aprisionado e acúmulo de íons sulfato.

Diversas pesquisas apontam a velocidade do efluente nas tubulações como fator de aceleração da produção de H<sub>2</sub>S, atuando no aumento da espessura da lama que se acumula na parte inferior dos tubos. Quanto menor a velocidade, maior a espessura da lama, o que cria uma zona anaeróbia mais favorável ao crescimento de BRS. Junta-se a isto, o fator tempo de detenção hidráulica do efluente. Quanto maior este período em que o esgoto fica parado na tubulação, mais favorável o processo de troca entre a fase líquida para gasosa do H<sub>2</sub>S. (HERISSON, 2012).

Isto representa um problema alarmante tanto econômico, quanto social e ambiental, pois os milhões de quilômetros de tubulações ao longo das redes de esgoto nas

idades podem estar em um nível altíssimo de deterioração, ou até mesmo colapsadas, devido às atividades microbiológicas deletérias ao concreto, porém o acesso para manutenção e reparos das mesmas, na maioria das vezes, é difícil, caro e até perigoso. Assim, grande parte dos esgotos domésticos e industriais coletados pode estar infiltrando no solo, sem tratamento prévio, poluindo o meio.

# CAPÍTULO 6

---

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora seja estudada há mais de um século por vários grupos de pesquisa ao redor do mundo, a corrosão do CCMI ainda representa um desafio atual para a comunidade científica. Por envolver a ação microbiológica e ter uma progressão lenta e complexa, o entendimento integral dos mecanismos da CCMI, suas causas e conseqüências, passa por correlações empíricas entre as situações reais nas instalações sanitárias com os ensaios de laboratório. Estes experimentos, mesmo com simulação acelerada e uso de amostras *in loco*, nem sempre conseguem reproduzir com precisão os processos reais de corrosão que ocorrem nas estruturas de saneamento existentes nas cidades.

Desta forma, a ampla revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa foi importante para ampliar os conhecimentos do fenômeno da CCMI em estruturas de saneamento, seus mecanismos, causas e conseqüências. A linha do tempo elaborada permitiu a visualização, de forma cronológica, do avanço dos estudos sobre os danos causados pelos microrganismos nas redes de esgoto pelo mundo.

Levando-se em conta os expressivos prejuízos financeiros, os transtornos e tragédias sociais e os significativos danos ambientais potencialmente causados pela CCMI em instalações sanitárias, conforme demonstrado amplamente nesta pesquisa, conclui-se que se trata de um grande problema a ser enfrentado pela sociedade, ainda que não haja atualmente uma percepção de sua real gravidade.

Assim, a tabela com os métodos de controle da CCMI elaborada nesta pesquisa, mostra, de forma resumida, as diversas tecnologias existentes atualmente para prevenir a ocorrência deste problema, das quais deve-se lançar mão para diminuir os danos causados pela CCMI em estruturas de saneamento.

Assim, uma vez compreendidos os mecanismos da CCMI e os seis métodos de controle, entende-se que é preciso repensar a forma de se construir as infraestruturas ligadas à coleta e tratamento de esgoto, haja vista que não deveriam ser planejadas, projetadas e construídas com os mesmos materiais e métodos construtivos utilizados na concepção das edificações convencionais. Neste sentido,

torna-se essencial lançar mão de materiais tecnologicamente avançados e técnicas construtivas inovadoras, que sejam capazes de suportar a agressividade do ambiente com esgoto e minimizar os efeitos da CCMI nas estruturas.

Por fim, destaca-se a responsabilidade da administração pública, uma vez que, geralmente, as obras de infraestruturas de saneamento estão inseridas em políticas públicas, sendo, portanto, de competência do governo. Desta forma, mesmo em obras de parcerias público-privadas (PPP), deve-se garantir que os editais de licitação considerem a importância da CCMI na escolha dos materiais e projetos, a fim de minimizar os mecanismos de deterioração das estruturas, reduzindo a possibilidade de inúmeros danos socioeconômicos e ambientais.

Recomenda-se os seguintes estudos para continuidade desta pesquisa:

- Elaboração de metodologia, baseados em pesquisas já realizadas, para ensaio acelerado que simule o ataque por ácido biogênico em laboratório, a fim de aprofundar os conhecimentos sobre o comportamento dos materiais utilizados na região frente à CCMI;
- Ensaio para verificar a resistência à CCMI de concretos produzidos com adição de resíduos provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais;
- Estudar a formação da Taumasita decorrente do ataque  $H_2SO_4$  biogênico ao concreto na CCMI e seu papel como produto expansivo e nocivo ao concreto, assunto ainda controverso na comunidade científica;
- Elaboração de projeto arquitetônico, executivo e estrutural detalhados de um sistema de esgotamento sanitário para o campus da Universidade Federal do Espírito Santo, levando em conta os fatores que favorecem a ocorrência da CCMI em estruturas de saneamento, de forma a poder minimiza-los, por meio da especificação de materiais e técnicas construtivas adequadas;
- Estudo sobre a possível ocorrência de CCMI nos pilares da 3ª ponte que liga a cidade de Vitória à cidade de Vilha Velha, por estes estarem inseridos em um meio com esgoto em alguns pontos.

# CAPÍTULO 7

---

## 7 REFERÊNCIAS

- AESDY, A.; OSTERHUS, S.W.; BENTZEN, G. **Controlled treatment with nitrate in sewers to prevent concrete corrosion**. Water Science & Tech. Water Supply. 2 (4), 137-144, 2002.
- AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, 2006.
- ALEXANDER M. G.; FOURIE, C. W. **Acid resistance of calcium aluminate cement in concrete sewer pipe mixtures**. Calcium Aluminate Cements. Edited by R.J.Mangabhai e F.P. Glasser 633–645, 2001.
- ALEXANDER, M. G.; FOURIE, C. **Performance of sewer pipe concrete mixtures with Portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack**. Materials and Structures. 44: 313 - 330, 2011.
- ALLSOPP, D.; SEAL, K.J. **Introduction to biodeterioration**. 1ed. London – UK: Edward Arnold, 1986.
- ALUM, A.; RASHID, A.; MOBASHER, B.; ABBASZADEGAN, M. **Cement-based Coatings for Controlling Algal Growth in Water Distribution Canals**. Cement & Concrete Composites. 30, p. 839-847, 2008.
- Assaad, V.; Jofriet, J.; Negi, S.; Hayward, G. **Corrosion of Reinforced Concrete Specimens Exposed to Hydrogen Sulfide and Sodium Sulfate**. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Vol.VII. Manuscript BC 03 013. April, 2005.
- ASCE. **Sulfide in Wastewater Collection and Treatment Systems**. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 69; American Society of Civil Engineers: New York, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASTM C 1012-04. **Standard test method for length change of hydraulic cement mortars exposed to a sulfate solution**. 6p, 2004.
- BAIRD, G. M. **Reforming our nation's approach to the infrastructure crisis**. Ntu Policy Paper, United States, 2013.

- BARBOSA, V. L.; BURGESS, J. E.; DARKE, K.; STUETZ, R. M., **Activated sludge biotreatment of sulphurous waste emissions**. Rev Env Sci Bio, 1(4), p. 345-362, 2002.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção 1**, Rio de Janeiro: LTC, 5ª Edição, 2000.
- BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W. **Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms**. Cement & Concrete Research, 35, 2333 – 2339, 2005.
- BERNDT, M. L. **Evaluation of coatings, mortars and mix design for protection of concrete against sulphur oxidising bacteria**. Constr. & Build., 25, 3893 – 3902, 2011.
- BICZOK, I. **Corrosion y Protección del Hormigón**. Trad. Emílio D'Ocion Asensi. Bilbao. España: URMO, p. 198-318, 1972.
- BICZOK, I. **Concrete corrosion and concrete protection**. Budapeste, 1964.
- BITTON, G. **Wastewater Microbiology**. 3 ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- BRANDÃO, A. M. da S. - **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. Dissertação de mestrado, 137 p, 1998.
- BOHM, M.; DEVINNY, J.; JAHANI, F.; ROSEN, G. **On a movingboundary system modeling corrosion in sewer pipes**. Appl. Math. Comput., 92(2-3), 247–269, 1998.
- CEB. **Durable Concrete Structures**. CEB Design Guide- Bulletin d'Information nº182, 1992.
- CESAN – Companhia Espiritosantense de Saneamento. Disponível em <<http://www.cesan.com.br>>. Acessado em 08/05/15.
- CHANDRA, S. **Properties of concrete with mineral chemical admixtures**. In Structure and Performance of Cements, by Barnes P Bensted J 141-185. London: Spon Press, 2002.
- CHANG, Z, T.; SONG, X. J.; MUNN, R.; MAROSSZEKY, M. **Using lime stone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack**. Cem. & Conc. Res. 35: 1486-1494, 2005.
- CORSINI, R. **Ambientes Agressivos**. Revista Techne. Edição 193. Jul/2013. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/196/ambientes-agressivos-projetos-de-estruturas-de-concreto-expostas-a-294033-1.aspx>>. Acesso em: 18/04/2015.
- COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Belo Horizonte, 246 f. Tese (Doutorado em

Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

COUTINHO, J. de S. **Durabilidade: ataque por sulfatos**. Apostila da disciplina. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2001.

CWALINA, B. **Biodeterioration of concrete**. ACEE Journal, 18A, 44-100, 2008.

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

DE BELIE, N.; MONTENY, J.; BEELDENS, A.; VINCKE, E.; VAN GEMERT, D.; VERSTRAETE, W. **Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes**. Cement and Concrete Research. 34(12): 2223 - 2236, 2004.

DIERCKS, M.; SAND, W.; BOCK, E. **Microbial corrosion of concrete**. Experientia. 47: 514 – 516, 1991.

DINIZ, R. C. O. **Estrutura e dinâmica da comunidade bacteriana presente em reatores de oxidação biológica de sulfeto**. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte, 2015.

DUBOSC, A. Étude du développement de salissures biologiques sur les parements en béton: mise au point d'essais accélérés de vieillissement. Toulouse: Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions. INSA – UPS, Complexe Scientifique de Rangueil, 249p. 2000.

EHRICH, S.; HELARD, L.; LETOURNEUX, R.; WILLOCQ, J.; BOCK, E. **Biogenic and Chemical Sulfuric Acid Corrosion of Mortars**. Journal of Materials in Civil Engineering. 11 (4), 340 - 344, 1999.

ELSHAHED, M. S.; SENKO, J. M.; NAJAR, F. Z.; KENTON, S. M.; ROE, B. A.; DEWERS, T. A.; SPEAR, J. R.; KRUMHOLZ, L. R. **Bacterial diversity and sulfur cycling in a mesophilic sulfide-rich spring**. Applied & Envi. Microbi., v.69, n.9, p. 5609-5621, 2003.

ESTOKOV, A.; HARBULAKOVA, V. O.; LUPTAKOVA, A.; STEVULOVA, N. **Study of the deterioration of concrete influenced by biogenic sulphate attack**. 20 International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA, Praga. Procedia Engineering, 42, 1731 – 1738, 2012.

FANG, H. H. P.; XU, L. C.; CHAN, K. Y. **Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion.** Water Research, 36, 4709 – 4716, 2002.

FERREIRA, J. P. S. **Construção de edifícios em ambiente aquático.** 2009, 95-f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

FOURIE, C.W. **Acid resistance of sewer pipe concrete. Masters dissertation,** Civil Engineering, Cape Town: University of Cape Town, 2007.

GANIGUE, R.; GUTIERREZ, O.; ROOTSEY, R.; YUAN, Z. **Chemical dosing for sulfide control in Australia: an industry survey.** Water Res. 45 (19), 6564 e 6574, 2011.

GAYLARDE, C.C; GAYLARDE, P.M. **Biodeterioration of historic buildings in Latin America** In: International Conference On Durability Of Materials And Components, 9, Austrália. Proceedings ... Australia, paper 171, 9p, 2002.

GEORGE, R. P.; VISHWAKARMA, V; SAMAL, S. S.; MUDALI, U. K. **Current understanding and Future Approaches for Controlling Microbially Influenced Concrete Corrosion: A Review.** Concrete Research, Vol. 3 (3), 2012.

Google Earth - <https://www.google.com.br/maps/@-20.2778523,-40.3061342,656m>, acesso em: 2016

GOTTSCHALK, G. **Bacterial Metabolism.** 2ª Edição, Alemanha, 1986

GOYNS, A. **Virginia Sewer Rehabilitation Project.** Progress report nº 2, Pretoria: PIPES a division of the Concrete Manufactures Association, 2004.

GOYNS, A. **Virginia sewer experiment data used in sewer design.** Civil Eng.: 52, 2008.

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

GUILLETTE, O. **Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies.** The Science of the Total Environment, v. 167, p. 215-220, 1995.

GUTIERREZ, O.; MOHANAKRISHNAN, J.; SHARMA, K.R.; MEYER, R.L.; KELLER, J.; YUAN, Z. **Evaluation of oxygen injection as a means of controlling sulfide production in a sewer system.** Water Res. 42 (17), 4549 e 4561, 2008.

GUTIERREZ, O.; PARK, D.; SHARMA, K.R.; YUAN, Z. **Effects of long-term pH elevation on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms.** Water Res. 43, 2549 e 2557, 2009.

GUTIERREZ, M. G. D.; PADILLA, G.; BIELEFELDT, A.; OVTCHINNIKOV, S.; HERNANDEZ, M.; SILVERSTEIN, J. **Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes.** Cement and Concrete Research, 40, 293 – 301, 2010.

GUTIERREZ, O.; SUDARJANTO, G.; REN, G.; GANIGUÉ, R.; JIANG, G.; YUAN, Z. **Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems.** Water Research. 48 (1), 569-578, 2014.

HAIJ CHEHADE, M. **Biodétérioration de mortiers armés par Acidithiobacillus thiooxidans.** Tese, Université des Sciences et Technologies de Lille., 223 p., 2010.

HARBULAKOVA, V. O.; ESTOKOV, A.; STEVULOVA, N.; LUPTAKOVA, A.; FORAIOVA, K. **Current Trends in Investigation of Concrete Biodeterioration.** Procedia Engineering, 65, 246 – 351, 2013.

HEARN, N.; HOOTON, R.D.; MILLS, R. H. **Pore structure and permeability.** In American Society for Testing Materials 169C, 240-260. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 1994.

HERISSON, J. **Biodeterioration des matériaux cimentaires dans les ouvrages d'assainissement: étude comparative du ciment d'aluminate de calcium et du ciment Portland.** Université Paris-Est, Tese, 280 p, 2012.

HERNANDEZ, M.; MARCHAND, E.A.; ROBERTS, D.; PECCIA, J. **In situ assessment of active Thiobacillus species in corroding concrete sewers using fluorescent RNA probes.** International Biodeterioration Biodegradation. 49: 271 – 276, 2002.

HEWAYDE, H.; NEHDI, M.; ALLOUCHE, E.; NAKHLA, G. **Effect of mixture design parameters and wetting -drying cycles on resistance of concrete to sulphuric acid.** Ame. Society of Civil Eng. 19 (2): 155-163, 2007.

HONDJUILLA MIOKONO, E. D. **Biodétérioration de Mortiers avec une succession de bactéries sulfo-oxidantes neutrophiles et acidophiles.** Teses, Université de Lille, 2013.

HOUSE, M.V; WEISS, W. J. **Review of microbially induced corrosion and comments on needs related to testing procedures.** 4<sup>o</sup> International Conference on the Durability of Concrete Structures, Purdue University, West Lafayette, IN, EUA, 2014.

HUDON, E.; MIRZA, S.; M.ASCE, FRIGON, D. **Biodeterioration of Concrete Sewer Pipes: State of the Art** and Research Needs. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2(2), 42-52, 2011.

HVITVED-JACOBSEN, T., VOLLERTSEN, J. AND NIELSEN, A.R.H. **Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks**, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C, 2013.

ISLANDER, R.L.; DEVINNY, J. S.; ASCE; MANSFELD, F.; POSTYN, A.; SHIH, H. **Microbial ecology of crown corrosion in sewers**. *Journal of Envir. Eng.*, 117: 751 – 770, 1991.

ISMAIL, N.; NONAKA, T.; NODA, S.; MORI, T. **Effect of carbonation on microbial corrosion of concretes**. *Journal of Const. Eng. and Management*. (474), 133-138, 1993.

JANA, D.; LEWIS, R.A. **Acid attack in a concrete sewer pipe – a petrographic and chemical investigation**. *Proc. 27th Int. Conf. Cem. Micro, ICMA, Victoria, Canada*, 2005.

JENSEN, H. S. **Hydrogen sulfide induced concrete corrosion of sewer networks**. *Tesis*, Aalborg University, Denmark, 2009

JIANG, G.; GUTIERREZ, O.; SHARMA, K.R.; KELLER, J.; YUAN, Z. **Optimization of intermittent, simultaneous dosage of nitrite and hydrochloric acid to control sulfide and methane productions in sewers**. *Water Res.* 45 (18), 6163 e 6172, 2011a.

JIANG, G.; GUTIERREZ, O.; YUAN, Z. **The strong biocidal effect of free nitrous acid on anaerobic sewer biofilms**. *Water Res.* 45 (12), 3735e3743, 2011b.

JIANG, G.; KEATING, A.; CORRIE, S.; O'HALLORAN, K.; NGUYEN, L.; YUAN, Z. **Dosing free nitrous acid for sulfide control in sewers: results of field trials in Australia**. *Water Res.* 47 (13), 4331e4339, 2013.

JIANG, G.; KELLER, J.; BOND, P.L. **Determining the long-term effects of H<sub>2</sub>S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion**. *Water Res.* 65, 157e169, 2014a.

JIANG, G.; WIGHTMAN, E.; DONOSE, B.C.; YUAN, Z.; BOND, P.L., KELLER, J. **The role of iron in sulfide induced corrosion of sewer concrete**. *Water Res.* 49, 166 e 174, 2014b.

JIANG, G.; SUN, X.; KELLER, J.; BOND, P. L. **Identification of controlling factors for the initiation of corrosion of fresh concrete sewers**. *Water Research*, 80, 30 – 40, 2015.

JOORABCHIAN, S. M. **Durability of concrete exposed to sulfuric acid attack**. *Theses and dissertations*. Paper 1486. 2010.

JOSEPH, A.P.; KELLER, J.; BOND, P.L. **Examination of concrete corrosion using a laboratory experimental set up simulating sewer conditions.** 6th Inter. Conf. on Sewer Processes and Networks. Surfers Paradise, Gold Coast, Australia, 2010.

KAEMPFER, W.; BERNDT, M. **Estimation of service life of concrete pipes in sewer networks.** E17 Durability of Building Materials and Components 8, 37-45, 1999.

KELLY, D. P.; WOOD, A. P. **Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. nov., Halothiobacillus gen. nov. and Thermithiobacillus gen. Nov.** International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 50, 511 – 516, 2000.

KHATRI, R. P.; SIRIVIVATNANON, V. **Role of permeability in sulphate attack.** Cement and Concrete Research, nº27, p.1179-1189, 1997.

KOYDON, S. **Contribution of sulfate- reducing bacteria in soil to degradation and retention of COD and sulfate.** Doctor Ingenieur. Zur Erlangung des akademischen Grades eines von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH). Karlsruhe, 2004.

LIMA, M. G. **CONCRETO Ensino, Pesquisa e Realizações.** Volume 1. São Paulo: IBRACON, Capítulo 24, 2005.

LITTLE, B. J.; LEE, J. S. **Microbiologically influenced corrosion:an update.** International Materials Reviews, Vol. 59, Nº 7, 2009.

MÁRQUEZ, J. F.; SHANCHEZ-SILVA, M.; HUSSERL, J. **Review of reinforced concrete biodeterioration mechanisms.** Viii International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2013.

MEDEIROS, M. H. F. de. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos.** São Paulo, 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

MEDEIROS, Marcelo H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, Paulo. **Durabilidade e Vida Útil das estruturas de Concreto.** In: Geraldo Isaia. (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 773-808, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILDE, K.; SAND, W.; WOLFF, W.; BOCK, E. **Thiobacilli of the Corroded Concrete Walls of the Hamburg Sewer System**. *Journal of General Microbiology*, 129, 1327 – 1333, 1983.

MIRANDA, A. M. **Influência da proximidade do mar em estrutura de concreto**. 204 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, 132 Universidade do Porto, Porto, 2006.

MONFRONT, L. **Réseau d'assainissement: gestion patrimoniale et tuyau en béton**. Edition du CERIB (Centre d'études et de recherche de l'industrie du béton), 2007.

MONTENY, J.; VINCKE, E.; BEELDENS, A.; DE BELIE, N.; TAERWE, L.; GEMERT, D. V.; VERSTRAETE, W. **Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete**. *Cem. & Conc. Research*, 31(9), 1359–65, 2000.

MORI, T.; NONAKA, T.; TAZAKI, K.; KOGA, M.; HIKOSABA, Y.; NODA, S. **Interactions of nutrients, moisture, and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes**. *Water Research*, 26, 29–37, 1992.

MOTSIELOA, N. **Acid Resistance of Sewer Pipe Concrete**. Dissertação: Universidade da Cidade do Cabo, 2012.

MUYNCK, W, D.; DE BELIE, N.; VERSTRAETE, W. **Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete**. *Cement & Concrete Composites* 31, 163–170, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2. ed. São Paulo: PINI, 2013.

NEVILLE, A. **The confused world of sulfate attack on concrete**. *Cement & Concrete Research*, 34, 1275 – 1296, 2004.

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

NIELSEN, A. H.; VOLLERTSEN, J.; JENSEN, H. S.; ANDERSEN, T. W.; JACOBSEN, T. H. **Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers**. *Water Research*, 42, 4206 – 4214, 2008.

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

OKABE, S.; ODAGIRI, M.; ITO, T.; SATOH, H. **Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems.** Appl Environ Microbiol, 73(3):971–80, 2007.

OLMSTEAD, W. M.; HAMLIN, H. **Converting portions of the Los Angeles outfall sewer into a septic tank.** Engineering News, 44, 317, 1900.

OMS/UNICEF. **Rapport sur les progrès en matière d'assainissement et d'alimentation en eau.** Programme commun Organisation mondiale de la Santé et UNICEF de suivi de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement. 2015.

PARANDE, A. K.; RAMSAMY, P. L.; ETHIRAJAN, S.; RAO, C. R. K.; PALANISAMY, N. **Deterioration of reinforced concrete in sewer environments.** Municipal Engineer, 159, Issue MEI, 11 – 20, 2006.

PARK, K.; LEE, H.; PHELAN, S.; LIYANAARACHCHI, S.; MARLENI, N.; NAVARATNA, D.; JEGATHEESAN, V.; SHU, L. **Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks - A review.** Inter. Biodeterioration & Biodegradation, 95, 251 – 261, 2014.

PARKER, C. D. **The isolation of a species of bacterium associated with the the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide.** Aust J Exp Biol Med Sci:23:91–8, 1945a.

PARKER, C. D. **The function of Thiobacillus concretivorus (nov. spec.) in the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide.** Aust J Exp Biol Med Sci; 23:91–8, 1945b.

PARKER, C. D.; PRISK, J. **The oxidation of inorganic compounds of sulphur by various sulphur bacteria.** J. gen. Microbiol. 8, 344, 1953.

PAVLIK, V.; UNCIK, S. **The Rate of corrosion of hardened cement paste and mortars with additive of silica fume in acids.** Cement and Concrete Rese. 27: 1731-1745, 1997.

PCA – Portland Ciment Assossiation. **Ettringite Formation and the Performance of Concrete.** Concrete Information. 2001.

PÉREZ, H. e VILLA, P. **Desulfuración biológica: Uma alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmosfera.** AIDIS, v.5, n.3, p.22-27, 2004.

PIKAAR, I.; SHARMA, K.R.; HU, S.; GERNJAK, W.; KELLER, J.; YUAN, Z. **Reducing sewer corrosion through integrated urban water managem.** Science, 345 (6198), 2014.

PINHEIRO, S. M. de M. - **Impacto da colonização do fungo *Cladosporium sphaerospermum* na argamassa do concreto.** Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Dissertação de mestrado, 135p, 2003.

PINHEIRO, S. M. M.; SILVA, M. R.. **Ações de Agentes Biológicos no Concreto. Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 1069 - 1094, 2011.

POMEROY, R. D. **Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems.** US EPA - Environmental Protection Agency, 1974.

POMEROY, R. D.; PARKHURST, J. D. **The forecasting of sulfide build-up rates in sewers.** Progress in Water Technology 9, 621–628, 1977.

POMEROY, R. D. **The Problem of Hydrogen Sulphide in Sewers.** Clay Pipe Development Association Limited, London, 1990.

POSTGATE, J. R. **The Sulphate Reducing Bacteria.** 2ª Edição, 1984.

REDNER, J. A.; ESFANDI, E. J.; WON, D. **Evaluation of protective coatings for concrete.** Final Report, California, 2004.

ROBERTS, D. J.; NICA, D.; ZUO, G.; DAVIS, J. L. **Quantifying microbially induced deterioration of concrete: initial studies.** Inter. Biode. & Biodegra. 49 (4):227–34, 2002.

ROMANOVA, A.; MAHMOODIAN, M.; CHANDRASEKARA, U.; ALANI, M. A. **Concrete Sewer Pipe Corrosion Induced by Sulphuric Acid Environment.** International Journal of Civil, Environmental, Structural, Constr. and Archit. Engineering Vol:9, No:4, 2015.

SANCHEZ, S. M.; ROSOWSKY, D. V. **Biodeterioration of construction materials: State of the art and future challenges.** Journal of Materials in Civil Eng. 20(5), 352–365, 2008.

SAND, W. **Importance of hydrogen sulfide, thiosulfate, and methylmercaptan for growth of *Thiobacilli* during simulation of concrete corrosion.** Applied Environmental Microbiology, 53, 1645 – 1648, 1987.

SAND, W. **Microbial Mechanisms of Deterioration of Inorganic Substrates - A general Mechanistic Overview.** Inter. Biode. & Biodeg., Vol 40, nº 2- 4, 183 – 190, 1997.

SAND, W.; DUMAS, T.; MARCDARGENT, S. **Accelerated Biogenic Sulfuric-Acid Corrosion Test for Evaluating the Performance of Calcium-Aluminate Based Concrete in Sewage Applications.** Microbio. Influen. Corrosion Testing, ASTM STP 1232, 1994.

SATOH, H.; ODAGIRI, M.; ITO, T.; OKABE, S. **Microbial community structures and in situ sulfate-reducing and sulfur-oxidizing activities in biofilms developed on mortar specimens in a corroded sewer system.** Water research. 43: 4729 - 4739, 2009.

SCHMIDT, T. **Sulfate Attack and the Role of Internal Carbonate on the Formation of Thaumassite.** Tese, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur - Institut des Matériaux, Suíça, 2007.

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

SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J.L.; LETOURNEUX, R. **High performance concretes from calcium aluminate cements.** Cement and Concrete Research 29: 1215-1223, 1999.

SHIRAKAWA, M A.; SATO, M. I.; SANCHES, P.S.; CINCOTTO, M. A.; RZYSKI, B.M. **Deterioração do concreto associada ocorrência de Thiobacillus.** Biodeterioração: anais do Simpósio Latino americano de..., Campos do Jordão, p.200-10, 1992.

SHIRAKAWA, M. A. **Estudo da biodeterioração do concreto por Thiobacillus.** São Paulo, 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) - Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 1994.

SHOOK W.E.; BELL, L. W. **Corrosion Control in Concrete Pipe and Manholes,** Technical Presentation, Water Environmental Federation, Florida, 1998.

SYDNEY, R.; ESFANDI, E.; SURAPANENI, S. **Control concrete sewer corrosion via the crown spray process.** Water Environ. Res.68 (3), 338 e 347, 1996.

SKALNY, J.; MARCAND, J.; ODLER, I. **Sulfate attack on concrete.** 1. Ed., 2002.

SOLEIMANI, S. **Prevention and controlo of microbiologically influenced concrete deterioration in wastewater concrete structures using E.coli biofilm.** Tese de Doutorado. Ottawa-Carleton Istitute for Environmental Engineering, Canadá, 2012.

SOUZA, R. B. de. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado.** São Paulo, 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** 1. ed. São Paulo: PINI, 1998.

STUFFLEBEAN, J., **Report on bids and awards of contract for the San Jose/Santa Clara water pollution control**, FY 2007/2008 CIP, east primary influent channel repair project. San Jose, California, 2007.

SUBLETTE, K..L.; KOLHATKAR, R.; RATERMAN, K. **Technological aspects of the microbial treatment of sulfide-rich wastewaters: a case study**. *Biodegradation*. 9 (3-4), 259-271, 1998.

SUN, X. **Improving the understanding of concrete sewer corrosion through investigations of the gaseous hydrogen sulfide uptake and transformation processes in the corrosion layer**. Tesis, University of Queensland, Australia, 2015.

SUN, X.; JIANG, G.; BOND, P. L.; KELLER, J.; YUAN, Z. **A novel and simple treatment for control of sulfide induced sewer concrete corrosion using free nitrous acid**. *Water Research*, 70, 279 -287, 2015a.

UFES – site: <http://www.ufes.br/>, acesso em: 2016.

US Environmental Protection Agency (EPA). **State of Technology for Rehabilitation of Wastewater Collection Systems**. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. EPA/600/R-10/078, 2010

US EPA. **Environmental Protection Agency. Hydrogen sulfide corrosion in wastewater collection and treatment systems**. Washington, 1991.

VAUGHN, O. D, **Undertanding biogenic sulfuric corrosion**. *Coating & Lining*, 2007.

VIDELA, H. A. **Prevention and control of biocorrosion**. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 49, 259 – 270, 2003.

VINCKE, E.; VERSTICHEL S.; MONTENY, J.; VERSTRAETE, W. **A new test procedure for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete**. *Biodegradation* 10: 421–428, 1999.

VINCKE, E.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. **Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes – a case study**. *Appl Microbiol Bio*. 57, 776 – 785, 2001.

VINCKE, E. **Biogenic Sulfuric Acid Corrosion of Concrete: Microbial Interaction, Simulatie em Preventie**. Tesis, University of Gant, Belgica, 2002.

VINCKE, E.; VAN WANSEELE, E., MONTENY, J.; BEELDENS, A.; DE BELIE, N., TAERWE, L. **Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete**. *Int Biodet. Biodeg.*, 49 (4): 283–92, 2002.

VOLLERTSEN, J.; NIELSEN, A. H.; JENSEN, H. S.; ANDERSEN, T.; JACOBSEN, T. H. **Corrosion of concrete sewers—The kinetics of hydrogen sulfide oxidation.** Science of the total environment, 394, 162 – 170, 2008.

WAKSMAN S. A.; JOFFE J. S. **Microorganisms concerned in the oxidation of sulfur in the soil II. Thiobacillus thiooxidans, a new sulfur-oxidizing organism isolated from the soil.** Journal of Bacteriology. 7:239 – 56, 1922.

WARSCHEID, T.; BRAAMS, J. **Biodeterioration of stone: a review.** International Biodeterioration & Biodegradation, v.46, p.343-368, 2000.

WEI, S.; JIANG, Z.; LIU, H.; ZHOU, D.; SANCHEZ, M. **Microbiologically induced deterioration of concrete - A Review.** Brazilian Journal of microbiology, 2013.

WEI, S.; SANCHEZ, M.; TEJO, D.; GILLS, C. **Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures.** Inter. Biodete. & Biodegra., 64, 748 e 754, 2010.

WELLS, T.; MELCHERS, R. E. **An observation-based model for corrosion of concrete sewers under aggressive conditions.** Cement and Concrete Res., 61 - 62, 1 – 10, 2014.

WELLS, T.; MELCHERS, R. E. **Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations.** Cement and Concrete Research, 77, 82- 96, 2015.

WELLS, T.; MELCHERS, R.; JOSEPH, A.; BOND, P.; VITANAGE, D. BUSTAMANTE, H.; GRAZIA, J.D.; KUEN, T.; ZAZIMEK, J.; EVANS, T. **A collaborative investigation of microbial corrosion of concrete sewer pipe in Australia,** 2012.

WELLS, T.; MELCHERS, R.E.; BOND, P. **Factors involved in the long term corrosion of concrete sewers.** Australia Corrosion Ass. Proce. of Corrosion and Prevention, 2009.

YAMANAKA, T.; ASO, I.; TOGASHI, S.; TANIGAWA, M.; SHOJI, K.; WATANABE, T.; WATANABE, N.; MAKI, K.; SUZUK, H. **Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth.** Water Res., 36, 2636 – 2642, 2002.

YUAN, H.; DANGLA, P.; CHATELLIER, P.; CHAUSSADENT, T. **Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack.** Cement and Conc. Res. 53, 267 – 277, 2013

ZHANG, L.; SCHRYVER, P. D.; GUSSEME, B. D.; MUYNCK, W. D.; BOON, N., VERSTRAETE, W. **Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: a review.** Water Research. 42(1–2): 1 – 12, (2008).

ZIVICA, V.; BAJZA, A. **Acidic attack of cement based materials – a review. Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures.** *Constru. & Buil. Mate.*, 16:215–22, 2002.

# CAPÍTULO 8

---

## 8 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ACHAL, V.; MUKHERJEE, A. **A review of microbial precipitation for sustainable construction.** Construction and Building Materials, 93, 1224 – 1235, 2015.

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater. 4500 – SULFATE.** 21. ed. Washington: APHA, 2005.

ATTIOGBE, E. K.; RIZKALA, S. H. **Response of Concrete to Sulfuric Acid Attack.** ACI Materials Journal, nº 85, 1988.

AVIAM, O.; BAR-NES, G.; ZEIRI, Y.; SIVAN, A. **Accelerated Biodegradation of Cement by Sulfur-Oxidizing Bacteria as a Bioassay for Evaluating Immobilization of Low-Level Radioactive Waste.** Applied and Environmental Microbiology. 6031 – 606, 2004.

BEECH, I. B. **Corrosion of technical materials in the presence of biofilms—current understanding and state-of-the art methods of study.** International Biodeterioration & Biodegradation, 53, 177 – 183, 2004.

BEECH, I. B.; SUNNER, J. **Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals.** Environmental biotechnology, 15, 181 – 186, 2004.

BENSTED, J. **Thaumasite - background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes.** Cement & Concrete Composites, 21, 117 – 121, 1999.

BINICI, H.; AKSOGAN, O. **Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters.** Cement & Concrete Composites, 28, 39 – 46, 2006.

CAYFORD, B. I.; DENNIS, P. G.; KELLER, J.; TYSON, G. W.; BOND, P. L. **High-Throughput Amplicon Sequencing Reveals Distinct Communities within a Corroding Concrete Sewer System.** Applied and Environmental Microbiology, Vol. 78, 19, 7160 – 7162, 2012.

COLLERAN, E.; FINNEGAN, S.; LENS, P. **Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams.** Antonie van Leeuwenhoek 67: 29-46, 1995

COLLETT, G.; CRAMMOND, N, J; SWAMY, R. N.; SHARP, J. H. **The role of carbon dioxide in the formation of thaumasite.**Cement & Concrete Composites, 34, 1599 – 1612, 2004.

CRAMMOND, N. **The occurrence of thaumasite in modern construction – a review.** Cement & Concrete Composites, 24, 393 – 402, 2002.

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

DE GRAEF, B.; DE WINDT, W; DICK, J; VERSTRAETE, W; DE BELIE, N. **Cleaning of concrete fouled by lichens with the aid of Thiobacilli.** Mate. & Struc. 38, 875 – 882, 2005.

DUCHESNE, J.; FOURNIER, B. **Deterioration of Concrete by the Oxidation of Sulphide Minerals in the Aggregate.** Journal of Civil Engineering and Architecture. Vol. 7, nº 8, 922 – 931, 2013.

EL-AZIZ, M. A.; SUFE, W. H. **Effect of sewage wastes on the physico-mechanical properties of cement and reinforced steel.** Ain Shams Eng. Journal, 4, 387 – 391, 2013.

ERICHSEN, A. C.; ANDERSEN, K. K.; MARK, O. **Sulphide Occurrence in Sewer Networks.** DHI User Conference, 1999.

FERREIRA, M.; JALALI, S.; GJORV, O. **Probabilistic assessment of the durability performance of concrete structures.** Revista Engenharia Civil, n. 21, p. 39-48, 2004.

GEHLEN, C.; SCHIESSL, P. **Probability based design for the Werstern-Scheldt Tunnel.** In: Duramet Workshop – Design of durability of concrete, 1999, Berlin. Proceedings... Berlin. p. 124-139, 1999

GONÇALVES, R.F. **Desinfecção de efluentes sanitários.** Rio de Janeiro: Programa PROSAB, ABES, 2003.

HARTMANN, C. M. *et al.* **Avaliação de alternativas para redução da concentração de sulfetos de hidrogênio na corrente líquida de estação anaeróbia de tratamento de esgoto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Recife. Anais... Recife: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2009.

HASPARYK, N. P. *et al.* **Contribuição ao estudo da influência de sulfetos presentes no agregado nas propriedades e durabilidade do concreto.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

HILL, J.; BYARS, E. A.; SHARP, J. H.; LYNSDALE, C. J., CRIPPS J. C., ZHOU, Q. **An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete.** Cement & Concrete Composites, 25, 997–1003, 2013.

HOBBS, D. W.; TAYLOR, M. G. **Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete.** Cement & Concrete Research, 30, 529 – 533, 2000.

HUECK, H. J. **The Biodeterioration of Materials - Na appraisal.** International Biodeterioration & Biodegradation, 48, 5 – 11, 2010.

HUGHES, P.; FAIRHURST, D.; SHERRINGTON, I.; RENEVIER, N.; MORTON, L. H. G.; ROBERY, P. C.; CUNNINGHAM, L. **Microscopic study into biodeterioration of marine concrete.** International Biodeterioration & Biodegradation, 79, 14 – 19, 2013.

JENSEN, H. S; LENS, P. N. L.; NIELSEN, J. L.; BERTER, K.; NIELSEN, A. H; JACOBSEN, T. H; VOLLERTSEN, J. **Growth kinetics of hydrogen sulfide oxidizing bacteria in corroded concrete from sewers.** Journal of Hazardous Materials 189, 685–691, 2011.

JENSEN, H. S; NIELSEN, A. H; JACOBSEN, T. H; VOLLERTSEN, J. **Hydrogen sulfide initiated corrosion in concrete sewers – a conceptual approach for prediction.** 11 International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, UK, 2008.

KONDRATYEVA, I. A.; GORBUSHINA, A. A.; BOIKOVA, A. I. **Biodeterioration of Construction Materials.** Glass Physics and Chemistry, Vol 32, 2, 254 – 356, 2006.

LEA, F. - **The Chemistry of Cement and Concrete**, 3rd Edition. Edward Arnold Ltd., London, 1970.

LEE, E. Y.; LEE, N. Y.; CHO, K. S.; RYU, H. W. **Removal of Hydrogen Sulfide by Sulfate-Resistant Acidithiobacillus thiooxidans AZ11.** Journal of Bioscience and Bioengineering. Vol. 101, nº 4, 309 – 314, 2006.

LEEMANN, A.; LOTHENBACH, B.; HOFFMAN, C. **Biologically induced concrete deterioration in a wastewater treatment plant assessed by combining microstructural analysis with thermodynamic modelling.** Cement and Concrete Research. 40: 1157 – 1164, 2010.

MACPHEE, D. E.; BARNETT, S. J. **Solution properties of solids in the ettringite—thaumasite solid solution series.** Cement and Concrete Research, 34, 1591 – 1598, 2004.

MARSHAL, K. **Biofilms, biofouling and biocorrosion.** TIBTECH Workshop, Vol 8, 1990.

MORIARTY, D. J. W.; NICHOLAS, J. D. **Electron transfer during sulphide and sulphite oxidation by thiobacillus concretivorus.** Biochi. et Biophy. Acta, 216, 130 – 138, 1970.

MORIARTY, D. J. W.; NICHOLAS, J. D. **Enzymic sulphide oxidation by thiobacillus concretivorus.** Biochimica et Biophysica Acta, 184, 114 – 123, 1969.

MORIARTY, D. J. W.; NICHOLAS, J. D. **Products of sulphide oxidation in extracts of thiobacillus concretivorus.** Biochimica et Biophysica Acta, 197, 143 – 151, 1970.

MUYZER, G.; STAMS, A.J. **The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria.** Nature Reviews Microbiology. 6(6): 441 – 454, 2008.

MUYNCK, W. D.; DEBROUWER, D.; BELIE, N. D.; VERSTRAETE, W. **Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials.** Cement and Concrete Research, 38, 1005 – 1014, 2008.

NASSER, C.; MERIAM, M. **Effect of the Addition of Microsilica on the Durability of Mortars Exposed To the Sodium Sulfate Attack.** Jordan Journal of Physics, Vol. 5, 1, 15 – 20, 2012.

NIELSEN, A. H.; JACOBSEN, T. H.; VOLLERTSEN, J. **Kinetics and stoichiometry of sulfide oxidation by sewer biofilms.** Water Research, 39, 4119 – 4125, 2005.

POSTGATE, J. R. **The Sulphate Reducing Bacteria.** 2ª Edição, 1984.

PIPILIKAKI, P.; PAPAGEORGIOU, D.; TEAS, Ch.; CHANIOTAKIS, E.; KATISIOTI, M. **The effect of temperature on thaumasite formation.** Cement & Concrete Composites, 30, 964 – 969, 2008.

ROSATO, V. G.; ABOUJO, A. L. **Degradation Bacteriana de Materiales Cementiceos.** Ciencia y Tecnología del Hormigón, nº 8, 2000.

ROUX, S. **Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle.** Tese, Université Louis Pasteur – Strasbourg I., 222 p, 2008.

ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; EL HACHEM, R.; GRONDIN, F. **Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks.** Cement and Concrete Research, 39, 1188 – 1198, 2009.

SAND, W.; BOCK, E. **Biodeterioration of Ceramic Materials by Biogenic Acids.** INTERNATIONAL BIODETERIORATION, 27, 175 – 183, 1991.

SECCO, M.; LAMPRONTI, G. I.; SCHLEGEL, M. C.; MARITAN, L.; ZORZI, F. **Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate–phosphate attack.** Cement and Concrete Research. 68, 49 – 63, 2015.

SIBBICK, R. G.; CRAMMOND, N. J.; METCALF, D. **The microscopical characterisation of thaumasite.** Cement & Concrete Composites, 25, 831 – 837, 2003.

SIBBICK, R. G.; FENN, D.; CRAMMOND, N. **The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack.** Cement & Concrete Composites, 25, 1059 -1066, 2003.

SILVA FILHO, L. C. P. Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do **efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Porto Alegre, 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994

SITTER, W. R. **Costs for service life optimization. The “Law of fives”. Durability of concrete structures, Proceedings...** Copenhagen: CEB-RILEM, p. 18-20 1984.

STEUDEL, R. **The chemical sulfur cycle**. In: Lens PNL, Hulshoff Pol LW (eds). Environmental technologies to treat sulfur pollution: principles and engineering. IWA publishing, London, UK, p.1-31, 2000.

SUBTIL, E. L. **Avaliação da redução de sulfato e produção de sulfeto dissolvido em reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando esgoto sanitário em escala real**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

SUN, X.; JIANG, G.; BOND, P. L; KELLER, J. **Impact of fluctuations in gaseous H<sub>2</sub>S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: The effect of high H<sub>2</sub>S loads**. Water Research, 81, 84 – 91, 2015b.

SUN, X.; JINAG, G.; BOND, P.L.; WELLS, T.; KELLER, J. **A rapid, nondestructive methodology to monitor activity of sulfide induced corrosion of concrete based on H<sub>2</sub>S uptake rate**. Water Research, 59, 229 – 238, 2014.

TANG, S. W.; YAO, Y.; ANDRADE, C.; LI, ZJ. **Recent durability studies on concrete structure**. Cement and Concrete Research 78, 143–154, 2015.

THORNTON, H. T. **Acid attack of concrete caused by sulfur bacteria action**. 1978

TORRES, S. M.; KIRK, C. A.; LYNSDALE, C. J.; SWAMY, R. N.; SHARP, J. H. **Thaumasite–ettringite solid solutions in degraded mortars**. Cement & Concrete Research, 34, 1297 – 1305, 2004.

VIDELA, H. A. **Manual of biocorrosion**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers; 1996.

VISHNIAC, W. **The Metabolism of Thiobacillus Thioparus**. California, 1952.

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

ZHOU, Q.; HILL, J.; BYARS, E. A.; CRIPPS, J. C.; LYNSDALE, C. J.; SHARP, J. H. **The role of pH in thaumasite sulfate attack**. Cement & Concrete Composites, 36, 160 – 170, 2006.

# ANEXOS

---

## ANEXO A

O Quadro 7 mostra de forma compilada e na ordem cronológica os principais estudos (levando em conta as pesquisas as quais a autora encontrou e pôde ter acesso) dos autores que mais produzem pesquisas na área de biodeterioração do concreto e CCMI, dentre teses, dissertações e artigos científicos, realizados ao longo do século XIX até os dias atuais.

Quadro 7 - Estudos sobre biodeterioração

Ano	Autores	Título
1900	OLMSTEAD, W. M.; HAMLIN, H	Converting portions of the Los Angeles outfall sewer into a septic tank
1945	PARKER, C. D.	The function of Thiobacillus concretivorus (nov. spec.) in the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide
1945	PARKER, C. D.	The isolation of a species of bacterium associated with the the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide.
1970	VAUGHN O'DEA	Undertanding biogenic sulfuric corrosion
1972	Biczók, I.	Concrete corrosion, concrete protection
1974	POMEROY	Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems
1978	THORNTON, H. T.	Acid attack of concrete caused by sulfur bacteria action
1982	MILDE, K. <i>et al.</i>	Thiobacilli of the Corroded Concrete Walls of the Hamburg Sewer System
1984	POSTGATE, J. R.	The sulphate reducing bacteria
1987	SAND, W.	Importance of hydrogen sulfide, thiosulfate, and methylmercaptan for growth of Thiobacilli during simulation of concrete corrosion
1988	ATTIOGBE, E. K.; RIZKALA, S. H.	Response of Concrete to Sulfuric Acid Attack
1991	DIERCKS, M. <i>et al.</i>	Microbial corrosion of concrete
1991	ISLANDER, R.L. <i>et al.</i>	Microbial ecology of crown corrosion in sewers
1991	SAND, W.; BOCK, E.	Biodeterioration of Ceramic Materials by Biogenic Acids
1992	MORI, T, <i>et al.</i>	Interactions of nutrients, moisture, and ph on microbial corrosion of concrete sewer pipes
1993	KAWAI, K. <i>et al.</i>	Concrete Deterioration Caused by Aerobic Bacteria
1993	YOSHIDA, N. <i>et al.</i>	Characterization and Identification of Bacterial Strains Isolated from Corroded Concrete in the Accumulation Stratum and Their Resistance Levels to Heavy Metals
1994	SAND, W, <i>et al.</i>	Accelerated Biogenic Sulfuric-Acid Corrosion Test for Evaluating the Performance of Calcium-Aluminate Based Concrete in Sewage Applications
1994	SHIRAKAWA, M. A	Estudo da biodeterioração do concreto por Thiobacillus
1995	COLLERAN, E. <i>et al.</i>	Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams

1997	SAND, W.	Microbial Mechanisms of Deterioration of Inorganic Substrates - A general Mechanistic Overview
1998	DAVIS, J. L., <i>et al.</i>	Analysis of concrete from corroded sewer pipe
1999	BENSTED, J.	Thaumasite - background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes
1999	EHRICH, S., <i>et al.</i>	Biogenic and chemical sulfuric acid corrosion of mortars
1999	ERICHSEN, A. C., <i>et al.</i>	Sulphide Occurrence in Sewer Networks
1999	HOBBS, D. W.; TAYLOR, M. G.	Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete
1999	KAEMPFER, W.; BERNDT, M.	Estimation of service life of concrete pipes in sewer networks
2000	KELLY, D. P.; WOOD, A. P.	Reclassification of some species of Thiobacillus to the newly designated genera Acidithiobacillus gen. Nov. Halothiobacillus genera Nov. and Thermithiobacillus genera Nov.
2000	NICA, D., <i>et al.</i>	Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers
2000	ROSATO, V. G.; ABOUJO, A. L.	Degradacion bacteriana de materiales cementicios
2001	MONTENEY, J., <i>et al.</i>	Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete
2001	VINCKE, E., <i>et al.</i>	Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes – a case study
2001	ZIVICA, V.; BAJZA, A.	Acidic attack of cement based materials a review. Part 1. Principle of acidic attack
2002	CRAMMOND, N.	The occurrence of thaumasite in modern construction – a review
2002	FANG, H. H. P., <i>et al.</i>	Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion
2002	HERNANDEZ, M., <i>et al.</i>	In situ assessment of active Thiobacillus species in corroding concrete sewers using fluorescent RNA probes
2002	ROBERTS, D. J., <i>et al.</i>	Quantifying microbially induced deterioration of concrete: initial studies
2002	TULLIANI, J. M., <i>et al.</i>	Sulfate attack of concrete building foundations induced by sewage waters
2002	VIDELA, H. A.	Prevention and control of biocorrosion
2002	VINCKE, E.	Biogenic Sulfuric Acid Corrosion of Concrete: Microbial Interaction, Simulatie em Preventie
2002	VINCKE, E., <i>et al.</i>	Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete
2002	YAMANAKA, T., <i>et al.</i>	Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth
2002	ZIVICA, V.; BAJZA, A.	Acidic attack of cement-based materials—a review Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures
2003	CRAMMOND, N. J.	The thaumasite form of sulfate attack in the UK
2003	PINHEIRO, S. M. de M.	Impacto da colonização do fungo Cladosporium sphaerospermum na argamassa do concreto
2003	SIBBICK, R. G., <i>et al.</i>	The microscopical characterisation of thaumasite
2003	SIBBICK, R. G., <i>et al.</i>	The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack
2004	AVIAM, O., <i>et al.</i>	Accelerated Biodegradation of Cement by Sulfur-Oxidizing Bacteria as a Bioassay for Evaluating Immobilization of Low-

		Level Radioactive Waste
2004	BEECH, I. B.	Corrosion of technical materials in the presence of biofilms—current understanding and state-of-the art methods of study
2004	BEECH, I. B.; SUNNER, J.	Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals
2004	COLLETT, G., <i>et al.</i>	The role of carbon dioxide in the formation of thaumasite
2004	DE BELIE, N., <i>et al.</i>	Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes
2004	DE GRAEF, B., <i>et al.</i>	Cleaning of concrete fouled by lichens with the aid of Thiobacilli
2004	MACPHEE, D. E.; BARNETT, S. J.	Solution properties of solids in the ettringite—thaumasite solid solution series
2004	NEVILLE, A.	The confused world of sulfate attack on concrete
2004	REDNER, J. A., <i>et al.</i>	Evaluation of protective coatings for concrete
2004	SIMS, I.; HUNTLEY, S. A.	The thaumasite form of sulfate attack-breaking the rules
2004	TORRES, S., <i>et al.</i>	Thaumasite–ettringite solid solutions in degraded mortars
2004	ZIVICA, V.	Acidic attack of cement based materials – a review Part 3: research and test methods
2005	Assaad, V., <i>et al.</i>	Corrosion of Reinforced Concrete Specimens Exposed to Hydrogen Sulfide and Sodium Sulfate
2005	BEDDOE, R. E.; DORNER, H. W.	Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms
2005	JANA D.; LEWIN R. A	Acid attack in a concrete sewer pipe – a petrographic and chemical investigation
2005	NIELSEN, A. H., <i>et al.</i>	Kinetics and stoichiometry of sulfide oxidation by sewer biofilms
2006	BINICI, H.; AKSOGAN, O.	Sulfate resistance of plain and blended cement
2006	KOHLER, S., <i>et al.</i>	Effect of ettringite on thaumasite formation
2006	KONDRATYEVA, I. A., <i>et al.</i>	Biodeterioration of Construction Materials
2006	LEE, E. Y., <i>et al.</i>	Removal of Hydrogen Sulfide by Sulfate-Resistant Acidithiobacillus thiooxidans AZ11
2006	PARANDE, A. K., <i>et al.</i>	Deterioration of reinforced concrete in sewer environments
2006	WIENER, M. S., <i>et al.</i>	Effect of H <sub>2</sub> S on corrosion in polluted waters: a review
2006	ZHOU, Q., <i>et al.</i>	The role of ph in thaumasite sulfate attack
2007	MONFRONT, L.	Réseaux d'assainissement : gestion patrimoniale et tuyau en béton
2007	OKABE, S., <i>et al.</i>	Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems
2007	SCHMIDT, T.	Sulfate Attack and the Role of Internal Carbonate on the Formation of Thaumasite
2008	CWALINA, B.	Biodeterioration of concrete
2008	GLASSER, F. P., <i>et al.</i>	Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions

2008	JENSEN, H. S., <i>et al.</i>	Hydrogen sulfide initiated corrosion in concrete sewers – a conceptual approach for prediction
2008	KURUGOL, S.; HATIPOGLU, D. D.	Biofilm Effect and Microbiological Deterioration on the Material Surface
2008	MEDEIROS, M. H. F.	Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos
2008	MUYNCK, W. D., <i>et al.</i>	Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials
2008	NIELSEN, A. H., <i>et al.</i>	Influence of pipe material and surfaces on sulfide related odor and corrosion in sewers
2008	PIPILIKAKI, P., <i>et al.</i>	The effect of temperature on thaumasite formation
2008	ROUX, S.	Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle
2008	SANCHEZ, S. M.; ROSOWSKY, D. V.	Biodeterioration of Construction Materials: State of the Art and Future Challenges
2008	VOLLERTSEN, J., <i>et al.</i>	Corrosion of concrete sewers—The kinetics of hydrogen sulfide oxidation
2008	WERITZ, F., <i>et al.</i>	Detailed depth profiles of sulfate ingress into concrete measured with laser induced breakdown spectroscopy
2008	ZHANG, L., <i>et al.</i>	Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review
2009	JENSEN, H. S.	Hydrogen sulfide induced concrete corrosion of sewer networks
2009	MUYNCK, W. D., <i>et al.</i>	Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete
2009	ROZIÈRE, E., <i>et al.</i>	Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks
2009	SATOH, H., <i>et al.</i>	Microbial community structures and in situ sulfate-reducing and sulfur-oxidizing activities in biofilms developed on mortar specimens in a corroded sewer system
2010	GIRARDI, F., <i>et al.</i>	Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack
2010	GUADALUPE, M. D., <i>et al.</i>	Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes
2010	CHEHADE HAJJ, M	Biodétérioration de mortiers armés par <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>
2010	JOORABCHIAN, S. M.	Durability of concrete exposed to sulfuric acid attack
2010	LEEMANN, A., <i>et al.</i>	Biologically induced concrete deterioration in a wastewater treatment plant assessed by combining microstructural analysis with thermodynamic modeling
2010	O'CONNELL, M., <i>et al.</i>	Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review
2010	VIITANEN, H., <i>et al.</i>	Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures
2010	WEI, S., <i>et al.</i>	Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures
2011	ALEXANDER, M. G.; FOURIE, C.	Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack

2011	BERNDT, M. L.	Evaluation of coatings, mortars and mix design for protection of concrete against sulphur oxidising bacteria
2011	HUDON, E., <i>et al.</i>	Biodeterioration of Concrete Sewer Pipes: State of the Art and Research Needs
2011	JENSEN, H. S., <i>et al.</i>	Growth kinetics of hydrogen sulfide oxidizing bacteria in corroded concrete from sewers
2011	MEDEIROS, M. H. F., <i>et al.</i>	Durabilidade e Vida Útil das estruturas de Concreto
2011	PINHEIRO, S. M. M.; SILVA, M. R	Ações de Agentes Biológicos no Concreto
2012	CAYFORD, B. I., <i>et al.</i>	High-Throughput Amplicon Sequencing Reveals Distinct Communities within a Corroding Concrete Sewer System
2012	DOPSON, M.; JOHNSON, D. B.	Biodiversity, metabolism and applications of acidophilic sulfur-metabolizing microorganisms
2012	ESTOKOV, A., <i>et al.</i>	Study of the deterioration of concrete influenced by biogenic sulphate attack
2012	GEORGE, R. P., <i>et al.</i>	Current understanding and Future Approaches for Controlling Microbially Influenced Concrete Corrosion: A Review
2012	HERISSON, J.	Biodeterioration des matériaux cimentaires dans les ouvrages d'assainissement : étude comparative du ciment d'aluminate de calcium et du ciment Portland
2012	NASSER, C.; MERIAM, M.	Effect of the Addition of Microsilica on the Durability of Mortars Exposed To the Sodium Sulfate Attack
2013	CORSINI, R.	Ambientes agressivos
2013	DUCHESNE, J.; FOURNIER, B	Deterioration of Concrete by the Oxidation of Sulphide Minerals in the Aggregate
2013	EL-AZIZ, M. A.; SUFE, W. H.	Effect of sewage wastes on the physico-mechanical properties of cement and reinforced steel
2013	HARBULAKOVA, V. O., <i>et al.</i>	Current Trends in Investigation of Concrete Biodeterioration
2013	HILL, J., <i>et al.</i>	An experimental study of combined acid and sulfate attack of concrete
2013	HONDJUILA MIKONO, E. D.	Biodétérioration de mortiers avec une succession de bactéries sulfo-oxydantes neutrophiles et acidophiles
2013	HUGHES, P., <i>et al.</i>	Microscopic study into biodeterioration of marine concrete
2013	WEI, S., <i>et al.</i>	Microbiologically induced deterioration of concrete - A Review
2013	YUAN, H., <i>et al.</i>	Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack
2014	HOUSE, M. V.; WEISS, W. J.	Review of microbially induced corrosion and comments on needs related to testing procedures
2014	LITTLE, B. J.; LEE, J. S.	Microbiologically influenced corrosion: an update
2014	PARK, K., <i>et al.</i>	Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks e A review
2014	PIKAAR, I., <i>et al.</i>	Reducing sewer corrosion through integrated urban water management
2014	SUN, X., <i>et al.</i>	A rapid, non-destructive methodology to monitor activity of sulfide-induced corrosion of concrete based on H <sub>2</sub> S uptake rate
2014	WELLS, T.; MELCHERS, R. E.	An observation-based model for corrosion of concrete sewers under aggressive conditions

2015	GRENGGA, C., <i>et al.</i>	Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network
2015	JIANG, G., <i>et al.</i>	Identification of controlling factors for the initiation of corrosion of fresh concrete sewers
2015	ROMANOVA, A., <i>et al.</i>	Concrete Sewer Pipe Corrosion Induced by Sulphuric Acid Environment
2015	SECCO, M., <i>et al.</i>	Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate–phosphate attack
2015	SUN, X.	Improving the understanding of concrete sewer corrosion through investigations of the gaseous hydrogen sulfide uptake and transformation processes in the corrosion layer
2015	SUN, X., <i>et al.</i>	A novel and simple treatment for control of sulfide induced sewer concrete corrosion using free nitrous acid
2015	SUN, X., <i>et al.</i>	Impact of fluctuations in gaseous H <sub>2</sub> S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: The effect of high H <sub>2</sub> S loads
2015	TANG, S. W., <i>et al.</i>	Recent durability studies on concrete structure
2015	WELLS, T.; MELCHERS, R. E.	Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations
	SKALNY, J. <i>et al.</i>	Sulfate attack on concrete

