

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JHENIFER MESQUITA DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DELETÉRIOS DE ÍONS SULFATO EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

JHENIFER MESQUITA DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DELETÉRIOS DE ÍONS SULFATO EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DELETÉRIOS DE ÍONS SULFATO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Por

JHENIFER MESQUITA DE ARAÚJO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 24 de novembro de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Profa. Adauto José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

Prof. Marcelo Queiroz Varisco, MSc.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

A Deus, que está acima de tudo e me possibilitou chegar até aqui. Nos momentos mais difíceis, a solução menos árdua era desistir, mas não o fiz, pois Ele me sustentou.

Aos meus pais, pelo carinho, apoio e dedicação, por acreditaram em mim mesmo quando eu não acreditava. Por todo esforço e amor, serei eternamente grata. Amo vocês!

Ao meu grande amigo Ricardo Henrique Fonseca Alves que me auxiliou com design dos gráficos e organogramas deste trabalho, me acalmou e aconselhou com sabedoria nos momentos de tensão. Que apesar da distância, sempre esteve presente quando precisei.

Ao meu amor Gustavo Ficanha, pela calma, paciência e compreensão. Por entender os momentos difíceis, por não desistir e por enxergar sempre o meu melhor.

Ao meu orientador e colega, professor Wellington Mazer, por toda paciência, ensinamentos, apoio e dedicação ao meu trabalho.

Ao Fábio Luiz Gomes Pignotti da Sanepar por ser tão prestativo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca, Aduino José Miranda e Marcelo Queiroz Varisco. Obrigada por toda atenção e contribuição ao meu trabalho.

A minha família e amigos, que mesmo de longe, sempre me apoiaram, foram compreensivos em minhas ausências e amorosos em todos os instantes.

A todos que de alguma forma participaram da realização deste trabalho e acreditaram no sucesso desta pesquisa.

RESUMO

O concreto, material mais utilizados nas obras de saneamento, torna-se suscetível a ataques em determinados ambientes considerados agressivos, como as estações de tratamento de esgoto. O ataque por íons sulfatos é muito comum nestes ambientes, e resulta na degradação acelerada do concreto, podendo comprometer toda estrutura de concreto armado. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as manifestações patológicas causada por estes íons, analisando o teor de sulfato em amostras de concreto retiradas de uma estação e a porosidade delas. O resultado obtido na análise de teor de sulfatos foi uma média de 7,84%, valores bem acima do limite máximo aceitável que seria em média 0,5%. Em relação a porosidade da amostra, constatou-se um aumento de 10%, em média, considerando uma amostra de concreto armado sem ataque.

Palavras-chaves: ataque; concreto; íons sulfatos; estação de tratamento de esgoto.

ABSTRACT

Concrete, the most used material in sanitation works, is susceptible to attack in certain places considered aggressive, such as wastewater treatment stations. Sulfate ions attack is very common in these places, resulting in accelerated degradation of the concrete, which can compromise any reinforced concrete structure. In this context, the present research aims to evaluate the pathological manifestations caused by these ions, analyzing the sulfate content in concrete samples taken from a station and their porosity. The result obtained in the sulfate content analysis was an average of 7.84%, values well above the acceptable maximum limit that would be on average 0.5%. In relation to the porosity of the sample, an increase of 10% was observed, on average, considering a sample of reinforced concrete without attack.

Keywords: attack; concrete; sulfate ions; wastewater treatment stations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Etringita - formato de agulha	20
Figura 2: Desenvolvimento de estrutura na pasta de cimento	21
Figura 3: Modelo de uma pasta de cimento bem hidratada	23
Figura 4: Representação diagramática da zona de transição e da matriz de cimento no concreto.....	24
Figura 5: Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto ..	27
Figura 6: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio	31
Figura 7: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de magnésio	33
Figura 8: Concreto atacado por íons sulfato com formação de taumasita	34
Figura 9: Pedaco de concreto de fundação de ponte deteriorado por íons sulfato ...	35
Figura 10: ETE Belém – Curitiba/ PR.....	37
Figura 11: Esquema da corrosão de um duto de concreto por ação dos sulfatos do esgoto	40
Figura 12: Tubo enterrado em solo contendo íons sulfato	41
Figura 13: Canal atacado por íons sulfatos provenientes da água.....	41
Figura 14: Reatores do tipo UASB	49
Figura 15: Layout da ETE	49
Figura 16: Tanques de coleta das amostras	50
Figura 17: Retirada das amostras	50
Figura 18: Corrosão das armaduras.....	51
Figura 19: Amostras de concreto a serem ensaiadas	52
Figura 20: Aquecimento da mistura de pó de concreto, água e ácido clorídrico	52
Figura 21: Solução filtrada utilizando papel filtro	53
Figura 22: Amostras de sulfato de bário após calcinação	53
Figura 23: Quantachrome Poremaster 33	54
Figura 24: Pressão aplicada ao mercúrio versus diâmetro do poro	59
Figura 25: Volume intrudido versus diâmetro dos poros	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais compostos do cimento Portland.....	18
Quadro 2: Reações químicas primárias durante a hidratação do cimento Portland..	20
Quadro 3: Produtos de hidratação do cimento	21
Quadro 4: Resumo dos principais fatores que afetam a ocorrência de odores	42
Quadro 5: Classes de Agressividade Ambiental	45
Quadro 6: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto	45
Quadro 7: Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos	46
Quadro 8: Classificação da agressividade ambiental.....	46
Quadro 9: Classificação dos Elementos Estruturais para Obras de Saneamento em Concreto Armado de Acordo com a NBR 6118.....	47
Quadro 10: Dados técnicos do Poremaster.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado do Ensaio de Determinação do Teor de Sulfato.....	56
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Cimento Portland Resistente a Sulfato	CP-RS
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO
Demanda Química de Oxigênio	DQO
Estação de Tratamento de Esgoto	ETE
Fator água/ cimento	a/c
Reator Anaeróbico de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente	RALF
Up-flow Anaerobic Sludge Blanket	UASB

LISTA DE ELEMENTOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

Acetato	$C_2H_3O_2$	
Ácido carbônico	H_2CO_3	
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	
Aftitelite	$(K,Na)_3Na(SO_4)_2$	
Água	H_2O	
Alumina	A	Al_2O_3
Aluminato de Cálcio Hidratado	$3CaO.Al_2O_3.Ca(OH)_2$	
Aluminato tricálcico	C_3A	$3CaO.Al_2O_3$
Arcanite	K_2SO_4	
Cal livre	C	CaO
Carbonato de cálcio	$CaCO_3$	
Dióxido de carbono	CO_2	
Dióxido de titânio	TiO_2	
Enxofre absoluto	S^0	
Etringita	$6CaO.Al_2O_3.3SO_4.32H_2O$	
Ferro aluminato tetracálcico	C_4AF	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$
Ferroaluminato de Cálcio Hidratado	$6CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3.12H_2O$	
Gás hidrogênio	H_2	
Gipsita	CSH_2	$CaSO_4.2H_2O$
Hidróxido de cálcio	CH	$Ca(OH)_2$
Hidróxido de magnésio, brucita	MH	$Mg(OH)_2$
Hidróxido de sódio	NaOH	
Íon hidroxila	OH^-	
Íon potássio	K^+	
Íon sódio	Na^+	
Magnésia	M	MgO
Metano	CH_4	
Monossulfato	$Ca_4Al_2(OH)_{12}.SO_4.6H_2O$	
Monossulfato hidratado	C_4ASH_{18}	
Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado	$3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O$	
Óxido de manganês (III)	Mn_2O_3	
Óxido de potássio	K_2O	
Óxido de silício	$Si(OH)_4$	
Óxido de sódio	Na_2O	
Óxido férrico	F	Fe_2O_3
Pirita	FeS_2	
Potencial de hidrogênio	Ph	
Sílica	S	SiO_2
Silicato de cálcio hidratado	C-S-H	$3CaO.2SiO_2.3H_2O$
Silicato de magnésio hidratado	M-S-H	

Silicato dicálcico	C_2S	$2CaO.SiO_2$
Silicato tricálcico	C_3S	$3CaO.SiO_2$
Singenite	$K_2Ca(SO_4)_2.H_2O$	
Sulfato	SO_4^{2-}	
Sulfato de amônia	NH_4SO_4	
Sulfato de cálcio	$CaSO_4$	
Sulfato de magnésio	$MgSO_4$	
Sulfato de sódio	Na_2SO_4	
Sulfeto	S^{2-}	
Sulfeto de hidrogênio/ gás sulfídrico	H_2S	
Taumasita	$Ca_3[Si(OH)_6]CO_3.SO_4.12H_2O$	
Trióxido de Enxofre	SO_3	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 ASPECTOS GERAIS	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO	18
2.1.1 Cimento Portland	18
2.1.2 Hidratação do Cimento	19
2.1.3 Fases Constituintes do Concreto	22
2.1.3.1 Fase Agregado	22
2.1.3.2 Pasta Endurecida	22
2.1.3.3 Zona de Transição	24
2.2 DURABILIDADE E DETERIORAÇÃO DO CONCRETO	24
2.2.1 Porosidade e Permeabilidade	25
2.2.2 Origem das Manifestações Patológicas	26
2.2.3 Agentes de Deterioração	26
2.3 ATAQUE POR SULFATOS	27
2.3.1 Mecanismos de Ataque	29
2.3.1.1 Ataque por Sulfato de Sódio (Na_2SO_4)	30
2.3.1.2 Ataque por Sulfato de Magnésio (MgSO_4)	31
2.3.1.3 Ataque por Sulfato de Cálcio (CaSO_4)	33
2.3.1.4 Ataque de Sulfato com Formação de Taumasita	34
2.3.2 Manifestação de Ataque	35
2.3.3 Formas de Prevenção	35
2.4 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	36
2.4.1 Tipos de Tratamento	37
2.4.1.1 Tratamento Anaeróbio	38
2.4.2 Problemas Causados por Sulfatos e Sulfetos nos Sistemas de Coleta e Tratamento de Esgotos	39
2.4.3 Mecanismo de Ataque	43
2.5 VALORES DE AVALIAÇÃO	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1. COLETA DAS AMOSTRAS	48
3.2. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SULFATO	51

3.3 ANÁLISE DA POROSIDADE DA AMOSTRA.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	62
ANEXO A – Quantificação da Concentração de Sulfatos em Amostra de Esgoto	67
ANEXO B – Relatório de Porosidade	68
ANEXO C – Distribuição do Tamanho dos Poros Por Volume Intrudido	69

1. INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O concreto e o aço são os dois materiais de construção mais comumente usados. O interesse pelas propriedades do concreto aumentou devido as especificações modernas que estabelecem requisitos quanto às propriedades particularizadas do concreto. Surgiram também diversos equipamentos que possibilitam uma melhor uniformidade do concreto. Com o conhecimento das propriedades e o auxílio destes instrumentos, é possível a escolha de um concreto mais adequado, acompanhado de vantagens técnicas e econômicas (NEVILLE, 1982).

O avanço obtido na técnica do concreto armado tem sido considerável. Verifica-se melhoria na qualidade dos materiais, utilização de métodos racionais de execução e um melhor conhecimento sobre comportamento e cálculo estrutural, possibilitando a execução de estruturas mais esbeltas que as de antigamente (CÁNOVAS, 1988).

Este desenvolvimento trouxe inúmeras vantagens, porém, essa nova estrutura exige busca por dimensões mínimas seguras, de modo que os efeitos agressivos, mecânicos ou químicos podem ter graves consequências, possibilitando que o concreto adoeça e, no pior dos casos, não possa suportar a enfermidade (CÁNOVAS, 1988).

O concreto armado é o material de construção mais utilizado na maioria das obras de saneamento (PINTO; TAKAGI, 2007). É cada vez maior a preocupação com a durabilidade do concreto, devido as patologias apresentadas, que comprometem sua funcionalidade e geram altos custos com ações corretivas.

Apesar dos estudos e tecnologias desenvolvidas, os sistemas de tratamento de água e esgoto estão cada vez mais agressivos e podem colocar em risco a durabilidade e a operação das estruturas de saneamento (PINTO; TAKAGI, 2007).

Os níveis de ataque variam de acordo com o ambiente em que a estrutura está inserida. A taxa de ataque químico varia em função do pH do fluido agressivo e da permeabilidade do concreto. O ataque por íons sulfato, reação álcali-agregado e corrosão das armaduras são os fenômenos responsáveis pela deterioração na maioria das estruturas de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), é comum encontrar concentrações de íons sulfato em ambientes naturais e industriais. Os sulfatos são espécies químicas iônicas que causam consideráveis manifestações patológicas no concreto armado. Entre elas estão a expansão e fissura do concreto, que torna o material mais permeável e aumenta o processo de deterioração, e conseqüentemente, a diminuição da resistência.

A patologia da construção está intimamente ligada à qualidade. Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), o concreto deve atender aos requisitos mínimos de qualidade, como capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade. É nesse contexto, que a pesquisa apresentada neste trabalho visa analisar os efeitos nocivos da concentração de íons sulfato nas estruturas de concreto em uma estação de tratamento de esgoto, as possíveis reparações aos danos estruturais que causam e as medidas preventivas requeridas para a máxima utilização da estrutura.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho possui objetivos gerais e específicos apresentados da seguinte forma:

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o ataque de íons sulfatos em uma estrutura de concreto armado de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a concentração de íons sulfatos numa amostra de concreto armado de uma Estação de Tratamento de Esgoto;
- Avaliar as manifestações patológicas causadas pelo ataque de íons sulfatos nessas estruturas;
- Analisar a porosidade das amostras de concreto.

1.3 JUSTIFICATIVA

Apesar do grande desenvolvimento obtido em relação às técnicas de concreto armado, a prática constante da manutenção preventiva, que é primordial para que a construção atenda a expectativa de utilização, ainda não é muito difundida, e na maioria das vezes, as ações corretivas são feitas após o término da vida útil, causando um considerável aumento do custo.

Nas estações de tratamento de esgoto, as estruturas de concreto estão em constante contato com agentes químicos, que interferem diretamente na estrutura molecular desse composto, causando manifestações patológicas e consequente diminuição da resistência do material.

Neste contexto, o presente trabalho, ao estudar os efeitos deletérios dos íons sulfatos em estruturas de concreto armado em estações de tratamento de esgoto, fornecerá subsídios para a reparação adequada das manifestações patológicas e recomendações de possíveis medidas preventivas, a fim de se obter uma otimização na vida útil do elemento estrutural.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

O concreto é uma pedra artificial, constituído basicamente da mistura de cimento, água, pedra e areia. O concreto de cimento Portland é um material poroso, com uma microestrutura bastante heterogênea e complexa. Para análise e controle das propriedades do concreto deve-se conhecer as características dos seus materiais constituintes e sua microestrutura, que é constituída pela pasta de cimento hidratado, agregado e zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado (NEVILLE, 1982).

2.1.1 Cimento Portland

Cimento, segundo Neville (1982), é um material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Mehta e Monteiro (2008) definem o cimento como um pó cinza composto de partículas angulares com dimensões diferentes, produzido a partir da moagem do clínquer com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, sendo o clínquer uma mistura de vários compostos, como óxido de cálcio e sílica, alumina e óxido de ferro.

Para o preparo de concreto, o cimento precisa ter a característica de dar pega e endurecer dentro d'água devido a uma reação química. Os cimentos com essas características são denominados cimento hidráulicos, e são formados principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio (NEVILLE, 1982)

As matérias primas utilizadas para a fabricação do cimento Portland são, principalmente, calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Os principais compostos do cimento Portland estão relacionados no Quadro 1.

Composto	Fórmula Química	Fórmula Comum	Taxa Usual por Peso (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45–60
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15–30
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6–12
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6–8

Quadro 1: Principais compostos do cimento Portland
Fonte: Adaptado de Manlouk e Zaniewski (2010)

Há também compostos secundários, como MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O e Na₂O, que representam um percentual reduzido de massa do cimento. Para Neville (1982), os óxidos de sódio e o potássio (Na₂O e K₂O), conhecido como álcalis, são os de maior interesse, pois reagem com alguns agregados e o produto das reações causam desintegração do concreto, além do efeito negativo no aumento da resistência do cimento (NEVILLE, 1982).

2.1.2 Hidratação do Cimento

A hidratação é a reação química entre as moléculas de cimento e a água. As principais características desta reação são a mudança no nível de energia e na taxa de reação. Visto que o cimento Portland é composto por vários compostos, muitas reações ocorrem simultaneamente (MANLOUK; ZANIEWSKI, 2010).

A hidratação das partículas do cimento pode ocorrer de duas maneiras: hidratação, que é a fixação direta de algumas moléculas de água e a hidrólise, que consiste na quebra de uma molécula por ação da molécula de água. Porém, é usual utilizar o termo hidratação para ambas formas. Os produtos desta hidratação são pouco solúveis em água, haja vista a estabilidade da pasta de cimento hidratada. A velocidade desta hidratação decresce continuamente de forma a permanecer quantidades significantes de cimento não hidratado (NEVILLE, 1982).

Quando hidratados, C₃S e C₂S fornecem as características desejadas do concreto. Os aluminatos hidratam mais rápido que os silicatos. A reação do C₃A com água é imediata e libera muito calor. A gipsita (CaSO₄.2H₂O) é usada para diminuir a taxa de hidratação dos aluminatos, porque penetra rapidamente na solução e produz íons sulfatos que limita a solubilidade dos aluminatos (MANLOUK; ZANIEWSKI, 2010).

Quando o cimento entra em contato com a água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a alta temperatura entram em solução e a fase líquida torna-se saturada com várias espécies de íons. O resultado da interação cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxilas é a formação de etringita, que são cristais aciculares (formato de agulha) de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, como pode ser visto na Figura 1 (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A etringita também é conhecida como Sal de Candlot.

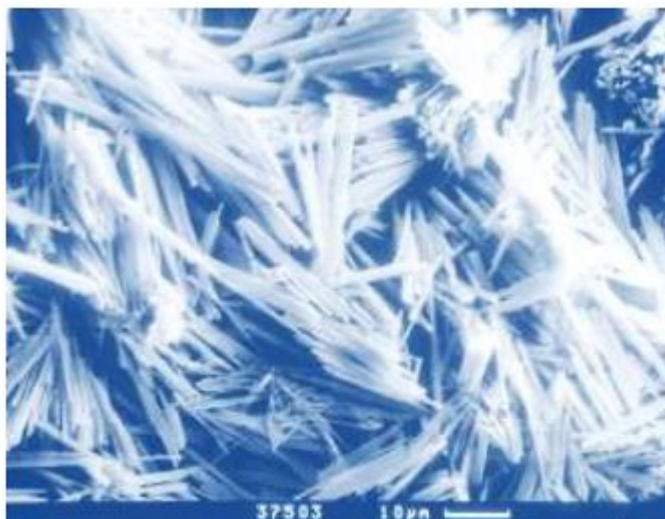


Figura 1: Etringita - formato de agulha
Fonte: Thomaz (2016)

Depois de um tempo, dependendo da relação alumina/sulfato do cimento, a etringita pode se tornar instável e decompor-se em monossulfato hidratado (C_4ASH_{18}), composto que torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfatos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Várias reações ocorrem durante o processo de hidratação do cimento Portland. No Quadro 2, verifica-se as reações primárias durante este processo e no Quadro 3, os produtos dessas reações e suas respectivas fórmulas químicas.

2 (3CaO.SiO ₂) Silicato Tricálcico	+ 6H ₂ O Água	=	3CaO.2 SiO ₂ .3H ₂ O Silicato de Cálcio Hidratado	+ 3 Ca(OH) ₂ Hidróxido de Cálcio
2 (2CaO.SiO ₂) Silicato Dicálcico	+ 4H ₂ O Água	=	3CaO.2 SiO ₂ .3H ₂ O Silicato de Cálcio Hidratado	+ Ca(OH) ₂ Hidróxido de Cálcio
3 CaO.Al ₂ O ₃ Aluminato Tricálcico	+ 12H ₂ O Água	+ Ca(OH) ₂ Hidróxido de Cálcio	= 3CaO.Al ₂ O ₃ .Ca(OH) ₂ .12H ₂ O Aluminato de Cálcio Hidratado	
4CaO.Al ₂ O ₃ .FeO ₃ Ferroaluminato Tetracálcico	+ 10H ₂ O Água	+ 2Ca(OH) ₂ Hidróxido de Cálcio	= 6CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ .12H ₂ O Ferroaluminato de Cálcio Hidratado	
2 CaO.Al ₂ O ₃ Aluminato Tricálcico	+ 10H ₂ O Água	+ CaSO ₄ .2H ₂ O Gipsita	= 3CaO.Al ₂ O ₃ .CaSO ₄ .12H ₂ O Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado	

Quadro 2: Reações químicas primárias durante a hidratação do cimento Portland
Fonte: Adaptado de Manlouk e Zaniewski (2010)

COMPOSTO	FÓRMULA	ABREVIACÃO
Hidróxido de cálcio, portlandita	Ca(OH)_2	CH
Silicato de cálcio hidratado	$x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$	C-S-H
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH ₂
Singenite	$\text{K}_2\text{Ca(SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
Monossulfato	$\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	
Taumasita	$\text{Ca}_3[\text{Si(OH)}_6]\text{CO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	
Hidróxido de magnésio, brucita	Mg(OH)_2	MH
Silicato de magnésio hidratado	$x\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$	M-S-H

Quadro 3: Produtos de hidratação do cimento

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

Na Figura 2 pode ser visto um resumo do processo de hidratação do cimento. O processo (a) representa a fase inicial do C-S-H; (b) formação de gel na superfície dos grãos de cimento; (c) desenvolvimento de um esqueleto fraco; (d) esqueleto torna-se rígido e o espaçamento entre os grãos de cimento aumenta; (e) endurecimento – espaços são preenchidos com produtos da hidratação (MANLOUK; ZANIEWSKI, 2010).

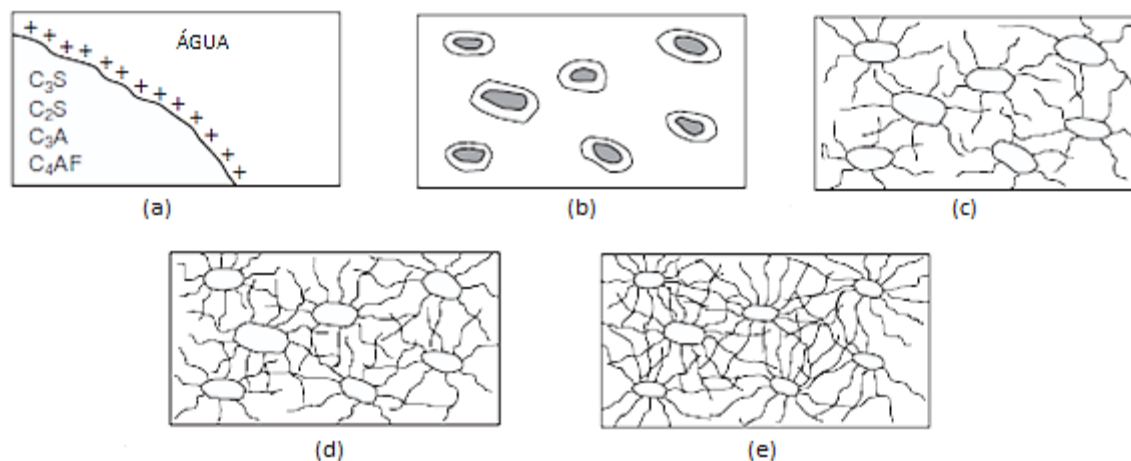


Figura 2: Desenvolvimento de estrutura na pasta de cimento

Fonte: Adaptado de Manlouk e Zaniewski (2010)

À medida que as partículas de cimento hidratam, o volume da partícula de cimento reduz, aumentando o espaço entre as partículas. Durante as fases iniciais de hidratação as ligações são fracas. Com o desenvolvimento da hidratação, o C-S-H desenvolve uma estrutura rígida, os grãos de cimento não se movem mais e o espaçamento entre os grãos aumenta à medida que os grãos são consumidos por hidratação. O processo de hidratação desenvolve rapidamente em idades precoces e continua, enquanto existirem partículas de cimento não hidratados e água livre. No

entanto, a velocidade de hidratação diminui com o tempo (MANLOUK; ZANIEWSKI, 2010).

2.1.3 Fases Constituintes do Concreto

2.1.3.1 Fase Agregado

De acordo com a NBR 7211 (ABNT,2009), os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, estáveis, compactos, duráveis e limpos. A peneira número 4, cuja malha é de 4,75mm, é limiar entre agregado graúdo e miúdo, sendo graúdo o material retido nesta malha e miúdo, o material passante.

A maior parte do volume de concreto é ocupada pelos agregados, porém isso não tem relação direta com a resistência do concreto. De acordo com Neville (1982), as propriedades dos agregados influenciam a durabilidade e o 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.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as propriedades do concreto, como massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional, dependem principalmente da densidade e da resistência dos agregados.

A aderência entre agregado e a pasta de cimento, causada pelo intertravamento devido à rugosidade da superfície do agregado, é um fator muito importante na resistência do concreto (NEVILLE, 1982).

2.1.3.2 Pasta Endurecida

Conforme Mehta e Monteiro (2008), a pasta endurecida, homogênea a olho nu, apresenta uma estrutura heterogênea formada pela fase sólida, vazios e água. As várias fases da pasta de cimento hidratada não são uniformemente distribuídas e nem uniforme no tamanho e na morfologia.

Para os autores Mehta e Monteiro (2008), os quatro sólidos mais importantes presentes na pasta de cimento hidratado são: silicato de cálcio hidratado (C-S-H), a fase mais importante, que compõe de 50% a 60% do volume total de sólidos em uma pasta de cimento hidratada; hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , que preenche de 20% a

25% do volume; sulfoaluminato de cálcio (etringita), ocupa de 15% a 20%, e os grãos de clínquer não hidratado, são produtos da hidratação *in situ* das partículas de clínquer, que devido à falta de espaço disponível, são densos e possuem uma morfologia semelhante à do clínquer original.

Os vazios são divididos por Mehta e Monteiro (2008) em espaço interlamelar no C-S-H, poros muito pequenos, irrelevantes na resistência e na permeabilidade, mas importantes na retração por secagem e fluência; vazios capilares, que correspondem ao espaço não ocupado pelo cimento ou pelos produtos de hidratação, determinantes da porosidade, que está diretamente relacionada à relação água/cimento e aos diferentes graus de hidratação; e ar incorporado e ar aprisionado, espaços muito maiores que os vazios capilares e podem afetar a resistência.

A água pode existir de diversas formas na pasta de cimento hidratada: água capilar, livre da influência das forças de atração entre as superfícies sólidas, água adsorvida, está próxima à superfície do sólido e é a principal responsável pela retração da pasta, água interlamelar, associada com a estrutura C-S-H por pontes de hidrogênio, e a água quimicamente tratada, integrante de vários produtos hidratados do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As várias fases essenciais presentes na microestrutura de uma pasta de cimento bem hidratada podem ser vistas na Figura 3.

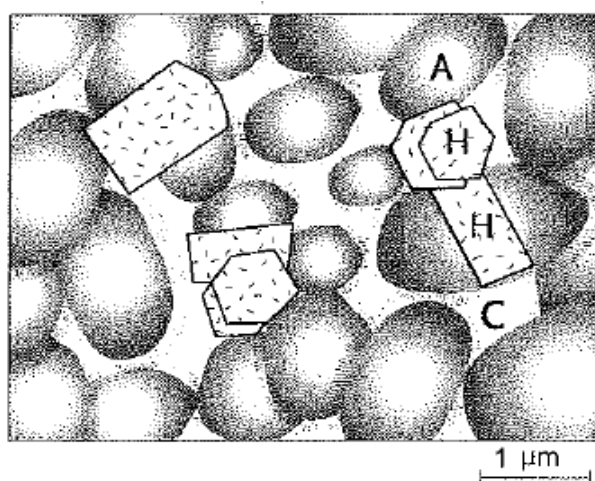


Figura 3: Modelo de uma pasta de cimento bem hidratada
Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Nota-se que as fases não são uniformemente distribuídas nem uniformes no tamanho e na morfologia. “A” representa a agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas, o “H” representa produtos cristalinos hexagonais como CH e “C” representa

cavidades capilares ou vazios que existem quando os espaços ocupados com água não são preenchidos com os produtos da hidratação do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1.3.3 Zona de Transição

Paulon (2005) define a zona de transição como a região de maior porosidade, devido à formação de cristais de grandes dimensões, como representado na Figura 4.

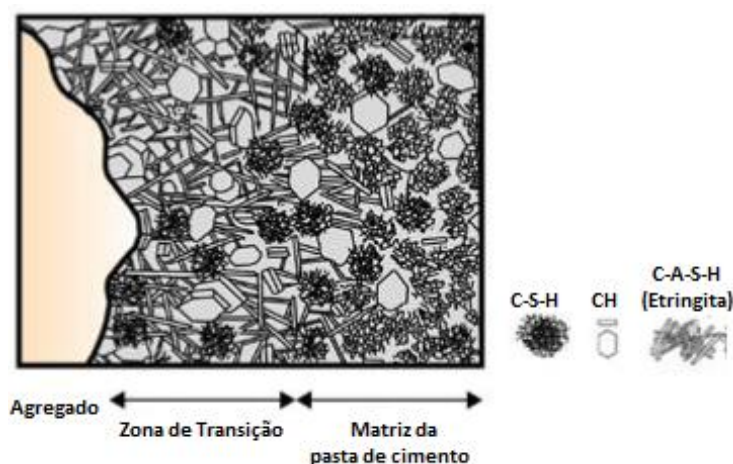


Figura 4: Representação diagramática da zona de transição e da matriz de cimento no concreto
Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

A microestrutura e as propriedades da zona de transição entre agregado e pasta de cimento hidratada são diferentes da matriz da pasta, apesar de serem compostas pelos mesmos elementos. Essa fase é considerada limiar à resistência do concreto, e é comumente chamada como o “elo mais fraco da corrente” (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.2 DURABILIDADE E DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

Para que o concreto seja considerado durável, precisa resistir às condições para qual foi projetado, sem deterioração e por um longo período de tempo. Vários fatores podem causar a deterioração do concreto, que podem ser devido ao ambiente externo em que está exposto ou por causas internas. As causas externas podem ser físicas, químicas ou mecânicas, como intempéries, grande variação de temperatura, ataque por líquidos ou gases, entre outras. São exemplos de causas internas as

reações álcali-agregados, variação de volume, etc. Mas raramente a deterioração ocorre devido a uma causa isolada (NEVILLE, 1982).

Em termos de durabilidade das estruturas de concreto, o elemento fundamental é a água, em sua forma líquida ou na forma de umidade. A água geralmente está presente em todos tipos de deterioração, e a facilidade com que preenche os sólidos porosos determina a taxa de deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Algumas formas básicas de prevenir qualquer ataque é o uso de práticas corretas na execução da estrutura de concreto. Cura e mistura adequadas, relação água/cimento condizente com o ambiente ao qual a estrutura estará exposta, baixa permeabilidade da estrutura, qualidade dos componentes da mistura, manutenção da estrutura, entre outros, são exemplos de fatores previnem manifestações patológicas (SKALNY *et al.*, 2002).

2.2.1 Porosidade e Permeabilidade

A permeabilidade do concreto, definida por Neville (1982) como a facilidade com que ele se satura com água, é a principal determinante da sua vulnerabilidade aos agentes externos, visto que a penetração de materiais em solução pode afetar de maneira contrária à sua durabilidade. A permeabilidade do concreto não é uma função simples da porosidade, medida da proporção do volume total de concreto ocupada por poros, mas também das dimensões, distribuição e continuidade dos poros (NEVILLE, 1982).

A permeabilidade está relacionada a vários fatores como grau de hidratação da pasta, relação água/ cimento, propriedades do cimento, entre outros. Quanto menor a relação a/c, mais próximos estarão os grãos de cimento e menor será a porosidade da pasta. O volume dos produtos da hidratação ocupa um lugar maior do que o cimento ocupava inicialmente, desse modo a porosidade diminui à medida que a hidratação evolui. Portanto, a porosidade do concreto diminui conforme ocorre a evolução da hidratação (idade do concreto) e reduz a relação água/cimento (NEVILLE, 1982).

2.2.2 Origem das Manifestações Patológicas

O conhecimento das origens da deterioração é importante para melhor entendimento das causas, determinação do grau de desenvolvimento, quais os possíveis reparos e para garantir que a estrutura não volte a ser atacada.

As patologias podem ser geradas devido a erros de projeto, que podem surgir na concepção, durante o estudo preliminar ou na elaboração do projeto executivo, como erros de dimensionamento, falta de compatibilização, especificação inadequada de materiais, detalhamento insuficiente, entre outros (MAZER; DE LIMA, 2008).

Erros de execução do projeto, que ocorrem principalmente devido à deficiência de qualificação profissional da equipe técnica, de utilização, quando a estrutura é utilizada para um fim que não foi planejada, assim como a escolha, recebimento e estocagem dos materiais, são outros exemplos de origem das manifestações patológicas (MAZER; DE LIMA, 2008).

2.2.3 Agentes de Deterioração

As causas da deterioração do concreto são divididas em químicas e físicas, sendo uma divisão totalmente arbitrária, visto que na prática as duas geralmente se superpõe, ou seja, ocorrem ao mesmo tempo e podem até se reforçar mutuamente (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O ataque por sulfatos é um tipo de deterioração causada por reações químicas, que é o foco principal do presente trabalho.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as causas físicas de deterioração do concreto são o desgaste superficial ou perda de massa devido à abrasão, erosão e cavitação, e fissuração devida a gradientes normais de temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a temperaturas extremas, como congelamento ou fogo.

Ainda conforme Mehta e Monteiro (2008), as causas químicas de deterioração são hidrólise de componentes da pasta por água mole, reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento, e reações químicas que levam à formação de produtos expansivos, que é o caso do ataque por sulfatos.

Na Figura 5, observa-se que os ataques químicos no concreto se manifestam através de efeitos físicos nocivos, como aumento da porosidade e permeabilidade,

diminuição da resistência, lascamento, fissuração, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

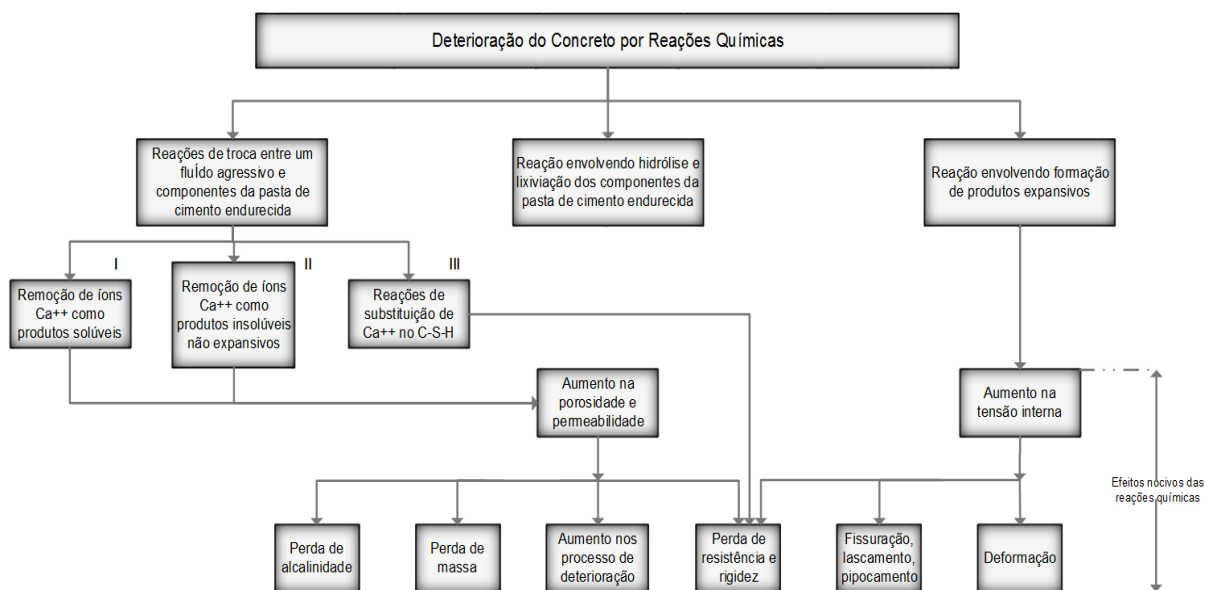


Figura 5: Tipos de reações químicas responsáveis pela deterioração do concreto
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

O valor do pH do concreto varia entre 12,5 e 13,5, e varia conforme a concentração de íons Na^+ , K^+ , OH^- . Com passar do tempo ou em contato com ambiente agressivo, o concreto vai perdendo sua alcalinidade. A taxa do ataque químico será função do pH do fluido agressivo e da permeabilidade do concreto. Quando o concreto com baixa permeabilidade é atacado por um fluido de pH superior a 6, a taxa de ataque químico é lenta demais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A princípio, qualquer ambiente cujo pH é menor que 12,5 pode ser considerado agressivo ao concreto, visto que ocorre uma reação química de redução da alcalinidade da solução, que levará a desestabilização dos produtos de hidratação dos materiais cimentícios (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3 ATAQUE POR SULFATOS

Segundo Neville (1982), as formas mais comuns de ataque químico são a lixiviação do cimento e ação dos sulfatos, água do mar e águas naturais levemente ácidas. Somente os sais dissolvidos reagem com a pasta de cimento hidratada, ou seja, sais na forma sólida não atacam o concreto.

Entre os vários sais que possuem efeito deletério ao concreto está o sulfato, que pode ser encontrado em águas naturais, no solo, no mar, chuvas ácidas, águas de pântanos, efluentes industriais, esgotos, entre outros, e é considerado um dos mais deteriorantes agentes da estrutura de concreto (COSTA, 2004).

O sulfato pode também ter origem interna. A fonte de sulfato pode estar no clínquer, devido as várias formas de adição sulfato de cálcio. Os compostos K_2SO_4 e $(K,Na)_3Na(SO_4)_2$ são as fases mais comuns de sulfato presentes no clínquer (SKALNY, *et al.*, 2002).

O ataque por sulfatos pode se dar de várias formas, pode ser tanto externo quanto interno. No caso de agregados contendo sulfetos, geralmente na forma de pirita (FeS_2), quando sofrem oxidação podem liberar íons sulfato, caracterizando o ataque de dentro para fora, ou ataque externo, em que a estrutura está exposta aos ambientes marinhos ou com efluentes de esgoto doméstico.

Para Costa (2004) existem dois meios conhecidos de ataque ao concreto por sulfatos: (1) reação com os produtos de hidratação da alumina e/ou aluminato tricálcico não hidratado, produzindo etringita e (2) reação com o hidróxido de cálcio produzindo gesso. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a concentração, a fonte dos íons sulfatos na água e a composição da pasta de cimento endurecida são fatores determinantes para predominância de um dos processos.

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o hidróxido de cálcio e as fases presentes no cimento hidratado que contem alumina são mais vulneráveis ao ataque por íons sulfatos. Quando estes compostos entram em contato com íons sulfato, se convertem à forma altamente sulfatada, conhecida com etringita. Essa formação pode levar à expansão, e com isso à fissuração e conseqüente redução da resistência e desempenho da peça, tudo devido à falta de resistência do concreto à tração

A etringita pode ser formada durante a hidratação do cimento (etringita primária), como visto anteriormente, ou a formação da etringita tardia, que segundo Melo (2010) é um processo bastante complexo que se caracteriza pela não formação ou decomposição térmica da etringita primária e reprecipitação de cristais em materiais cimentícios já endurecidos, ou seja, o íon sulfato não é oriundo de fontes externas, mas do interior do próprio material, através de agregados contaminados ou cimento com alto teor de sulfatos.

As expansões no concreto relacionadas aos íons sulfatos são associadas à formação de etringita, porém os mecanismos pelos quais a etringita gera expansão é

um tema controverso. Alguns autores afirmam ser devido à pressão exercida pelo crescimento de cristais, enquanto outros, à adsorção de água em meio alcalino por uma etringita pouco alcalina (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Costa (2004) esquematiza as reações de maneira simplificada:

- hidróxido de cálcio + sulfato + água = gipsita
- aluminato tricálcico + gipsita + água = monossulfato
- monossulfato + gipsita + água = etringita

A formação de gipsita também pode causar expansão. Porém, tem-se observado que primeiro há redução do pH do sistema e perda da rigidez e resistência, e depois expansão e fissuração, que transforma o concreto em uma massa pastosa ou não coesiva (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A intensidade do ataque por sulfato varia com o íon cátion que está ligado ao radical SO_4^{2-} . Apesar da solubilidade dos sulfatos de sódio (Na_2SO_4) e o de magnésio (MgSO_4) serem maior, a ordem crescente de agressividade começa com o sulfato de cálcio (CaSO_4), passando pelos sulfatos acima citados respectivamente, e termina com o sulfato de amônia (NH_4SO_4) (COSTA, 2004).

2.3.1 Mecanismos de Ataque

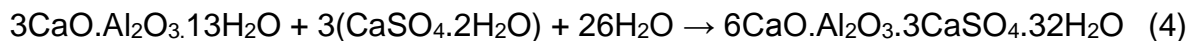
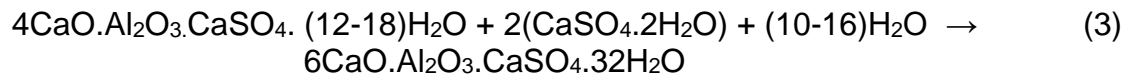
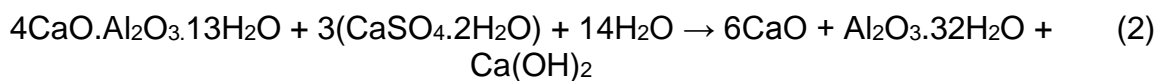
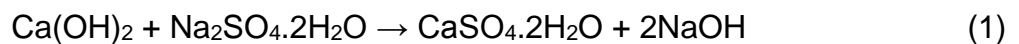
Conforme relatado por Souza (2006), o processo completo de deterioração do concreto pelo ataque de sulfatos envolve três etapas principais:

- (a) Difusão dos íons agressivos nos materiais de base cimentícia, através da rede de poros existente (função da porosidade e permeabilidade);
- (b) Reações químicas entre os íons e produtos da hidratação do cimento (portlandita, monossulfoaluminato e outros aluminatos hidratados) formando compostos que geram expansão (etringita e gipsita);
- (c) Fissuração da matriz que resulta na perda de resistência e desintegração (pode estar associada a descalcificação do C-S-H).

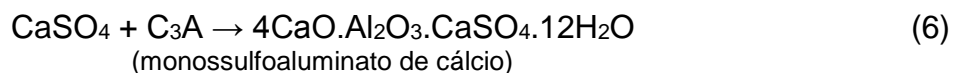
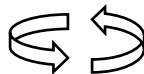
Paralelo a este processo, pode acontecer a cristalização dos sais de sulfato, que ocupam mais espaço que os sais dissolvidos. Portanto, o ataque por sulfatos ocorre formando, etringita, gipsita e cristalização de sais (SOUZA, 2006).

2.3.1.1 Ataque por Sulfato de Sódio (Na₂SO₄)

O ataque por sulfato de sódio causa duas reações principais, que são a formação de gipsita através da reação do sulfato de sódio com hidróxido de cálcio (Equação 1), e a reação da gipsita formada com aluminato de cálcio hidratado, sulfoaluminato de cálcio hidratado ou aluminato remanescente do cimento anidro (C₃A), que formam a etringita (Equações 2, 3 e 4 respectivamente) (SOUZA, 2006).



A transformação do monossulfoaluminato em etringita é uma reação de reversão: a etringita, instável, é convertida em monossulfoaluminato, que é o produto final da hidratação do cimento, que em contato com íons sulfatos, muda-se a condição do equilíbrio e esta reação tende a retornar ao seu estado inicial, formando novamente etringita, como pode ser visto nas equações 5 e 6 (SOUZA, 2006).



Conforme Santhanam (2003), os processos de ataque pelo íon sulfato de sódio são:

- a. A solução de sulfato de sódio difunde-se para o interior do concreto.

- b. Nos vazios da pasta de cimento, nas regiões próximas a superfície começam a se formar compostos expansivos, etringita e gipsita.
- c. Os compostos expansivos preenchem os vazios da pasta, gerando tensões internas no material, que são suportadas pela região inalterada da pasta de cimento.
- d. Os poros não suportam mais as tensões internas, e inicia-se um processo de fissuração.
- e. A solução de sulfato continua a se difundir pela região não alterada, através das fissuras, e formam mais compostos expansivos, que tendem a dar seqüência no modelo de ataque.

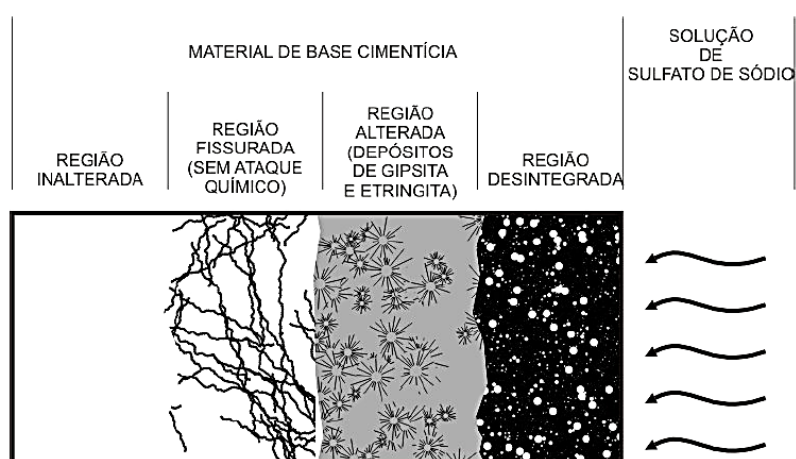
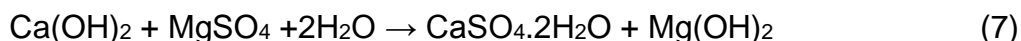


Figura 6: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio
Fonte: Souza (2006)

Após o ataque do concreto por sulfato de sódio, o material cimentício fica dividido em quatro regiões: região inalterada, região fissurada, região alterada e região desintegrada, como exemplificado na Figura 6.

2.3.1.2 Ataque por Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$)

O fato do sulfato de magnésio ser mais solúvel que o de sódio e o de cálcio o torna mais agressivo ao concreto. O ataque por sulfato de magnésio ocorre a uma taxa crescente. Na reação há formação de gipsita e brucita, como mostra a equação 7. A descalcificação do C-S-H devido ao contato com sulfato de magnésio também forma gipsita e brucita (SOUZA, 2006).



Da mesma forma que ocorre com sulfato de sódio, a gipsita formada reage com compostos da hidratação do cimento formando etringita. A brucita (Mg(OH)_2) e os silicatos hidratados, oriundo das descalcificação do C-S-H, causa o principal efeito desse ataque que é a formação de M-S-H, silicato de magnésio hidratado, um produto de baixa resistência mecânica, detalhado na equação 8 (SOUZA, 2006).



Os processos de ataque por sulfato de magnésio são resumidos a seguir, de acordo com Santhanam (2003):

- a. Difusão da solução de sulfato de magnésio para o interior do concreto, formando uma camada de brucita na superfície do material. Forma-se também gipsita junto à camada de brucita;
- b. Na formação de brucita há redução do pH da pasta, devido ao alto consumo de portlandita. Com isso, o C-S-H libera portlandita para aumentar o pH, que contribui para descalcificação da estrutura;
- c. A brucita é um gel impermeável que forma uma barreira e dificulta a difusão da solução para a parte não afetada;
- d. Há formação de gipsita e etringita (compostos expansivos) sob a camada de brucita, causando tensões internas nas camadas inalteradas que geram fissurações (similar ao ataque por sulfato de sódio);
- e. Em algumas regiões há degradação direta do C-S-H, que resulta em perda de resistência e desintegração da pasta.

A seção de material cimentício atacada por sulfato de magnésio fica dividida em regiões: camada de brucita e gipsita paralela à superfície do material, região de depósito de produtos de ataque, região isolada de descalcificação do C-S-H, formando M-S-H, região fissurada e região inalterada, como observado na Figura 7.

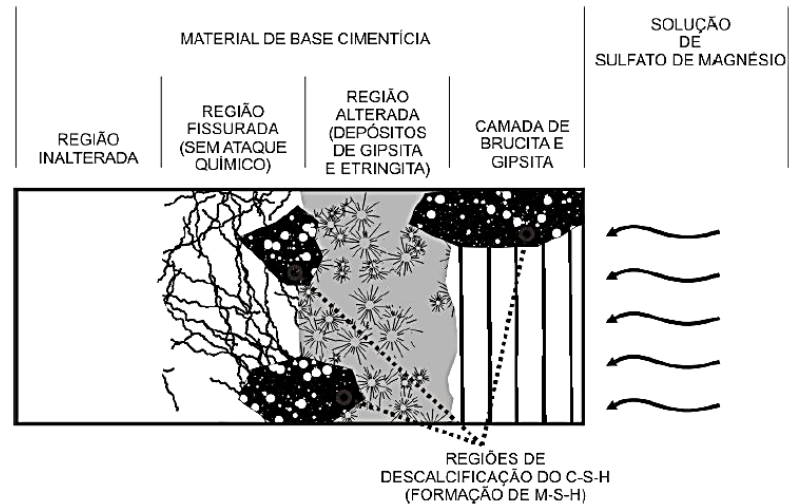


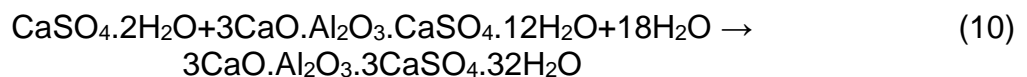
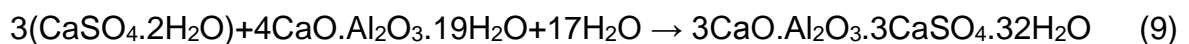
Figura 7: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de magnésio
Fonte: Souza (2006)

O ataque por sulfato de magnésio é inferior ao ataque por sulfato de sódio, pelo fato da camada de brucita dificultar a difusão da solução. Porém, por ocorrer descalcificação do C-S-H, este ataque pode ser mais severo, com redução da resistência e desintegração da pasta de cimento hidratada. A camada de brucita pode ser fissurada pela ação dos íons de sulfato de sódio, intensificando o ataque ao concreto (SOUZA, 2006).

2.3.1.3 Ataque por Sulfato de Cálcio (CaSO_4)

O ataque por sulfato de cálcio é menos agressivo que o por sódio e magnésio devido à sua baixa solubilidade na água. O $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ é conhecido comercialmente por gesso (COSTA, 2004).

O sulfato de cálcio reage com aluminato de cálcio hidratado e com o monossulfoaluminato (conforme equações 9 e 10, respectivamente) para formar a etringita.



Da mesma forma que o ataque por outros tipos de íons sulfato, no ataque por sulfato de cálcio há formação de etringita no concreto já endurecido, que gera expansões e conseqüente deformações que causam a fissuração da estrutura.

2.3.1.4 Ataque de Sulfato com Formação de Taumasita

Segundo Pinheiro-Alves *et al.* (2007), por muito tempo se considerou a formação de gipsita e etringita como a única forma de ataque por sulfatos. A estrutura da etringita e da taumasita são muito parecidas, e muitas vezes são até confundidas.

De acordo com Coutinho (2001), para que haja formação de taumasita há necessidade de íons sulfatos e carbonatos, silicatos cálcicos hidratados ou não, e umidade. Temperaturas baixas parecem ser mais favoráveis à formação de taumasita.

O ataque de sulfato com formação de taumasita se difere dos ataques citados anteriormente, com formação de gipsita e etringita, pois não são os aluminatos cálcicos que são atacados, mas os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), que é o principal agente ligante do cimento Portland, ou seja, responsável pela coesão do concreto endurecido, incluindo dos resistentes a sulfatos, e contribui de forma direta na resistência do concreto (COUTINHO, 2001).

Quando o C-S-H é substituído por taumasita, há redução das propriedades ligantes no concreto endurecido, com perda de resistência e transformação numa pasta sem coesão, mostrada na Figura 8 (CRAMMOND; HALLIWELL, 1997).



Figura 8: Concreto atacado por íons sulfato com formação de taumasita
Fonte: Thomaz (2016)

Como a formação de taumasita depende da quantidade de C-S-H e não de C_3A presente no concreto, os cimentos Portland resistentes a sulfatos (CP-RS), que são cimentos com baixo teor de C_3A , não inibem a formação de taumasita.

2.3.2 Manifestação de Ataque

O concreto atacado por sulfatos tem uma aparência esbranquiçada característica, como visto na Figura 9. É comum a deterioração começar nos cantos e arestas, e é seguida de uma fissuração progressiva e desprendimento de partes que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole (NEVILLE, 1982).



Figura 9: Pedaco de concreto de fundação de ponte deteriorado por íons sulfato
Fonte: Thomaz (2016)

Além da desagregação por expansão e fissuração, a perda de resistência do concreto causada pela perda de coesão da pasta de cimento, e a perda de aderência entre a pasta e as partículas de agregado também são consequências do ataque por sulfatos no concreto (NEVILLE, 1982).

2.3.3 Formas de Prevenção

Conforme Mehta e Monteiro (2008), o ataque ao concreto por íons sulfatos dependem da quantidade e natureza do sulfato, o nível da água e sua variação sazonal, o fluxo de água subterrânea, a porosidade do solo, a forma de construção da estrutura de concreto e a qualidade desse material. Visto esses fatores, a única forma de impedir a solução de sulfato atacar o concreto é controlar sua da qualidade.

A qualidade do concreto, principalmente a baixa permeabilidade, é a melhor proteção contra o ataque por sulfatos. A deterioração pode ser controlada pela relação água/ cimento, o tipo de cimento, a adição de minerais, adensamento adequado, bem como o método adequado de cura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O tipo de cimento é um dos fatores responsáveis pela resistência do concreto. Existem cimentos resistentes a sulfatos, porém, em alguns casos, a massa específica e a permeabilidade do concreto modificam sua durabilidade, prevalecendo assim, sobre o tipo de cimento (NEVILLE, 1982).

O uso de cimentos com baixo teor de C_3A reduz a vulnerabilidade do concreto ao ataque por sulfatos. O uso de pozolanas também pode melhorar a resistência aos sulfatos, pois elas removem o $Ca(OH)_2$ livre e inativam as fases que contem alumina. Com a adoção de pozolana, é necessário um tempo mínimo que permita o desenvolvimento da atividade pozolânica antes que o concreto seja exposto aos sulfatos (NEVILLE, 1982).

Apesar de melhorar a resistência do concreto ao ataque de sulfatos, o uso de pozolana com cimentos resistentes aos sulfatos pode interferir na hidratação dos aluminatos de cálcio, possibilitando a reação deste composto com sulfatos que se infiltrem no concreto posteriormente. Por isso, algumas normas internacionais não permitem o uso de cinzas volantes com esse tipo de cimento quando o objetivo é melhorar a resistência ao ataque de sulfatos (NEVILLE, 1982).

De acordo com Thomaz (2016), para se obter um concreto sem deterioração na presença de sulfatos deve-se usar um fator água/cimento menor que 0,4, um volume grande de cimento resistente a sulfato no traço (no mínimo 400 kg/m^3), uso de microsílica (aproximadamente 5% da massa de cimento), apesar de não ser eficiente para situações onde a exposição aos sulfatos é intermitente, utilizar cimento com baixo teor de C_3A e é inevitável que a cura úmida seja longa para evitar o aparecimento de microfissuras durante o endurecimento do concreto, aumentando assim, a resistência ao ataque de íons sulfatos.

2.4 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Esgoto é o termo usado para caracterizar os despejos provenientes das diversas modalidades do uso e da origem das águas, tais como as de uso doméstico, comercial, industrial, as de utilidade pública, de áreas agrícolas, etc. Portanto, o

esgoto, ou águas residuais, apresenta características naturais alteradas, e carrega matéria sólida, matéria orgânica e inorgânica (JORDÃO; PESSÔA, 2009)

O manejo incorreto do esgoto causa poluição, e pode prejudicar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, além de afetar o meio ambiente. Neste contexto, surgiram as estações de tratamentos de esgoto (JORDÃO; PESSÔA, 2009). É exposto na Figura 10 a ETE Belém, localizada em Curitiba (PR).



Figura 10: ETE Belém – Curitiba/ PR

Fonte: <http://www.panoramio.com/photo/43146310> Acesso em: 05/12/16

A implantação de uma estação de tratamento de esgotos tem por objetivo a remoção dos principais poluentes presentes nas águas residuais, retornando-as ao corpo d'água sem alteração de sua qualidade (BORSOI *et al*, 1997).

2.4.1 Tipos de Tratamento

A escolha do sistema de tratamento é função das condições estabelecidas para a qualidade da água dos corpos receptores. Além disso, qualquer projeto de sistema deve estar baseado no conhecimento de diversas variáveis do esgoto a ser

tratado, tais como a vazão, o pH, a temperatura, a demanda bioquímica de oxigênio – DBO, entre outros (BORSOI *et al*, 1997).

Quanto aos tipos de tratamentos, existem três grupos de classificação: tratamento físico (gradeamento e desarenação, por exemplo); tratamento químico, que predominam as reações químicas, como a desinfecção com cloro; e o tratamento biológico, que prevalecem as reações bioquímicas e a participação de microrganismos (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

O tratamento de esgoto é dividido em algumas fases. A primeira fase é o tratamento preliminar, que envolve a retirada de material grosseiro. Em seguida é realizado o tratamento primário, em que ocorre a remoção de sólidos suspensos sedimentáveis e o tratamento secundário, considerada a fase mais efetiva do tratamento, que consiste na remoção de matéria orgânica, solúvel e particulada, e é uma etapa exclusivamente biológica. No tratamento terciário, há remoção de poluentes específicos, como patogênicos, nitrogênio, fosforo, matéria inorgânica e outros (BORSOI *et al*, 1997).

O tratamento biológico é a forma mais eficiente de remoção da matéria orgânica dos esgotos, que é o principal objetivo do tratamento de esgoto no Brasil. Os microrganismos decompõem a matéria orgânica presente no esgoto para crescimento e reprodução, e faz parte do processo de respiração celular, ou seja, a matéria orgânica é substrato para os microrganismos (BORSOI *et al*, 1997).

Os processos biológicos podem ser aeróbios, há necessidade de oxigênio para o seu desenvolvimento, ou anaeróbios, não necessitam de oxigênio. Existem vários métodos de tratamento de efluentes a nível secundário, e os mais comuns são as lagoas de estabilização, lagoas aeradas, lodos ativados, filtros de percolação e reatores anaeróbios (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

2.4.1.1 Tratamento Anaeróbio

O tratamento anaeróbio é um processo em que as bactérias anaeróbias convertem compostos orgânicos em biogás na ausência de oxigênio. O tratamento anaeróbico é uma solução para a estabilização do lodo de esgotos domésticos e para o tratamento de despejos líquidos. Existem duas formas de retenção do lodo nas unidades de tratamento: o filtro anaeróbico (o lodo se acha aderido a um material

inerte de suporte) e reator UASB ou RALF (o lodo se acha suspenso, agregado na forma de floco ou grânulo) (JORDÃO; PESSÔA, 2009).

Os reatores UASB possuem como característica o fato da biomassa crescer dispersa no meio, sem nenhum tipo de material de enchimento para suporte. A imobilização dos microrganismos ocorre por auto-adesão, com a formação de flocos ou grânulos densos suspensos, que se dispõem em camadas de lodo no fundo do reator (CAMPOS, 1999).

Segundo Baréa (2006), o processo anaeróbico é separado em quatro fases:

- (1) Hidrólise: quebra de cadeias polímeras em compostos mais simples (monômeros).
- (2) Acidogênese: Processo de oxidação-redução em que os monômeros são reduzidos a ácidos graxos voláteis (CO_2 e H_2) por bactérias acidogênicas. Segundo Versiani (2005), nesta etapa também há formação de ácido sulfúrico (H_2S) e outros ácidos.
- (3) Acetogênese: Bactérias acetogênicas transformam os ácidos graxos formados na fase anterior em acetato. Há produção de CO_2 e H_2 .
- (4) Metanogênese: Bactérias metanogênicas transformam acetato ($\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) em metano (CH_4).
- (5) Sulfetogênese: Versiani (2005) cita uma quinta fase específica para esgotos que contém compostos de enxofre. Estes compostos são reduzidos a sulfetos pela ação de bactérias redutoras de sulfato.

2.4.2 Problemas Causados por Sulfatos e Sulfetos nos Sistemas de Coleta e Tratamento de Esgotos

A decomposição da matéria orgânica em pântanos, lagos rasos, poços de mineração assim como em tubulações de esgoto leva a formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), que pela ação bacteriana se transforma em ácido sulfúrico (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A estrutura interna das tubulações de esgoto está frequentemente submetida à rápida deterioração, que em casos extremos pode conduzir à completa deterioração do concreto. Esta deterioração é observada apenas na parte da estrutura que está acima do nível da água/esgoto. O resultado desses processos é a redução do material da seção transversal (SKALNY *et al.*, 2002).

As bactérias redutoras de sulfato precisam de oxigênio para consumir a matéria orgânica que existe na água do esgoto. Quando o oxigênio não está disponível, elas retiram o oxigênio dos íons sulfato (SO_4), deixando livre os íons sulfetos (S). A reação do sulfeto com a água resulta no gás sulfídrico, que é absorvido pelas partes superiores do tubo de concreto, onde é novamente oxidado e transformado em ácido sulfúrico. Esse ácido ataca o concreto na parte superior do coletor, transformando o hidróxido de cálcio do concreto em gesso (SOUZA, 2006). Este processo é ilustrado na Figura 11.

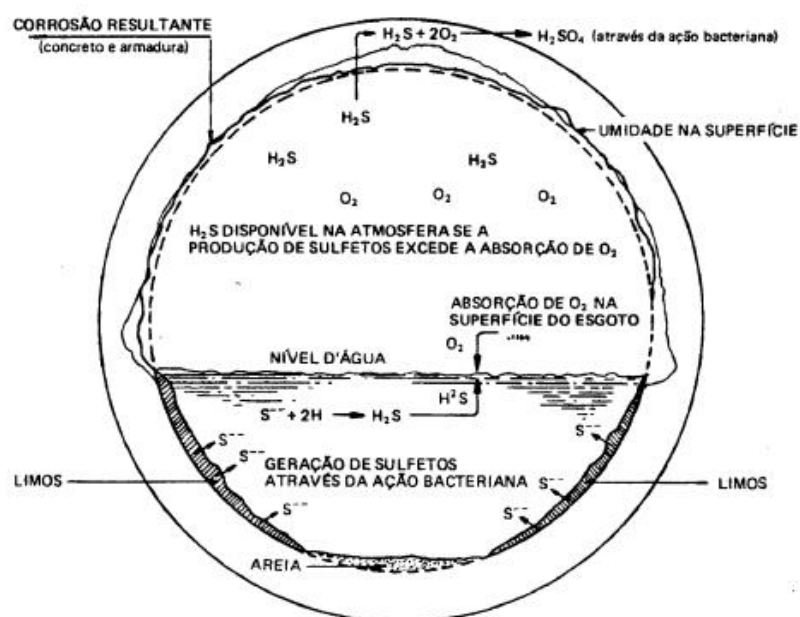


Figura 11: Esquema da corrosão de um duto de concreto por ação dos sulfatos do esgoto
Fonte: Helene (1986)

Nas Figuras 12 e 13 tem-se exemplos de concretos atacados por íons sulfatos. O tubo na Figura 12 esteve enterrado em solo contendo sulfatos. O concreto foi feito com pouco cimento, e apesar da parte interna não ter sido atacada, mostra como o concreto era poroso.

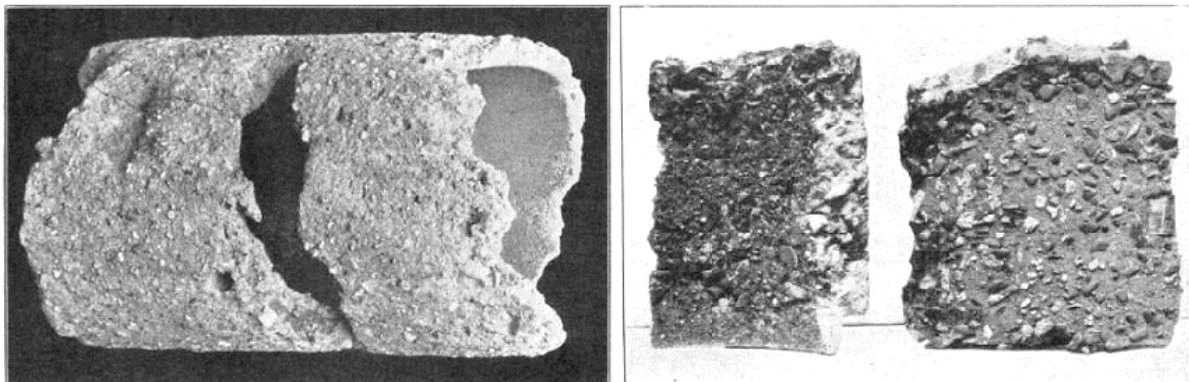


Figura 12: Tubo enterrado em solo contendo íons sulfato
Fonte: Thomaz (2016)

O canal ilustrado na Figura 13 é um exemplo de concreto atacado por íons sulfatos provavelmente provenientes da água do conduto.



Figura 13: Canal atacado por íons sulfatos provenientes da água
Fonte: Thomaz (2016)

Nas tubulações de esgoto que possuem trechos com pouca declividade, haverá depósito de matéria orgânica permitindo que as bactérias existentes na tubulação, ou nos reatores, em condições anaeróbicas, transformem o sulfato em sulfeto, ocorrendo a liberação de gás sulfídrico. Portanto, a preocupação com índice de sulfatos em estação de tratamento de esgoto é devido a dois problemas que ele causa de forma indireta: odor e corrosão nas tubulações de esgotos que ocorrem devido a reação citada acima (SAWYER; *et al.*, 2003).

O odor é causado principalmente pela presença de H₂S, considerado o gás mais característico de geração do mal cheiro, que além de desagradável, compostos como gás sulfídrico apresentam alta toxicidade (Hartmann *et al.*, 2009). Segundo Antunes (2006), o odor em ocorrência de compostos sulfurados caracteriza por um cheiro de ovo podre ou vegetais em decomposição, como couve e alho.

Antunes (2006) mostra, no Quadro 4, os principais fatores limitantes da produção de compostos odoríferos na água residual e da libertação destes compostos da água para a atmosfera.

Fatores	Produção e libertação de compostos odoríferos	
	Aumenta	Diminui
Dimensão do sistema de drenagem	Grande	Pequeno
Regime de escoamento e interface líquido-gás	Turbulento e na presença de concentrações elevadas de compostos odoríferos	Turbulento e na presença de concentrações reduzidas de compostos odoríferos
Composição da água residual	Concentrações elevadas e com compostos reduzidos	Concentrações reduzidas de compostos oxidados
Oxigênio dissolvido	Indisponível	Disponível
pH - amoníaco, aminas e outros compostos orgânicos voláteis a partir de meios alcalinos - sulfeto de hidrogênio, mercaptanos e ácidos orgânicos voláteis – compostos voláteis a partir de meios ácidos	pH > 9 pH < 7	- -
Temperatura	>16° C	<16° C

Quadro 4: Resumo dos principais fatores que afetam a ocorrência de odores
Fonte: Antunes (2006)

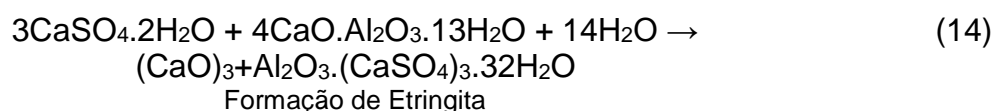
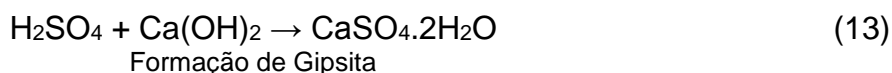
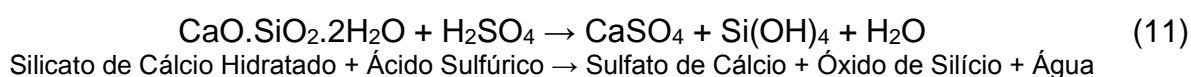
A temperatura, a quantidade de oxigênio e principalmente o nível pH do esgoto são fatores que afetam a medida de odor (ANTUNES, 2006), ou seja, a redução de sulfato a sulfeto de hidrogênio é comprometida, e conseqüentemente, a taxa de odor e corrosão. O pH varia nas tubulações de esgoto com o tempo e o espaço, ou seja, de acordo com a taxa de fermentação de matéria orgânica, quantidade de matéria orgânica, o tempo de retenção hidráulica, o próprio pH de descarga, que varia entre 7,2 e 8,5 para residências e contribuições de esgoto industrial, que o pH costuma ser bem baixo. Em alguns casos, substâncias alcalinas, como hidróxido de magnésio por exemplo, são adicionadas às águas residuais a fim de aumentar o pH e diminuir a quantidade de gás sulfídrico dissolvida (SHARMA; *et al.*, 2013).

2.4.3 Mecanismo de Ataque

Segundo Pinto e Takagi (2007), os níveis de ataque ao concreto variam de acordo com cada ambiente das estações de tratamento de água e efluentes, sendo que o ataque pode ser proveniente dos próprios produtos químicos usados rotineiramente no tratamento.

A corrosão de concreto é um processo de deterioração que afeta sistemas de esgotos em todo o mundo. A corrosão provoca perda da massa de concreto, rachaduras das tubulações de esgoto e, pode causar colapso estrutural. O reforço ou substituição de tubulação de esgotos danificados envolve custos muito elevados (JIANG; *et al.*, 2013).

No concreto em contato com esgoto ocorre o processo de carbonatação e acidificação do H₂S. O processo de acidificação pode reduzir o pH do concreto de 12 para 9, o que proporciona condições favoráveis para propagação de compostos a base de enxofre e microrganismos oxidantes de sulfeto na superfície do concreto. Estes microrganismos oxidantes favorecem a produção de mais ácido sulfúrico, o que leva à formação de dois produtos importantes de corrosão, a etringita e gipsita, conforme as equações 11, 12, 13 e 14 (JIANG; *et al.*, 2013).



Como visto anteriormente, gipsita e etringita são compostos expansivos, que podem causar fissuração e pode desencadear uma série de manifestações patológicas.

2.5 VALORES DE AVALIAÇÃO

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), os materiais constituintes do concreto não podem conter substâncias prejudiciais em quantidades que possam comprometer a durabilidade do concreto ou causar corrosão da armadura.

Ainda conforme a NBR 12655 (ABNT, 2006), as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob condições ambientais previstas e utilizados conforme preconizado em projeto, apresentem os requisitos exigidos de segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante toda vida útil.

Segundo Mockaitis (2008), a forma mais estável e difundida dos compostos de enxofre é o íon sulfato, que pode ser encontrado desde o esgoto sanitário, na concentração de 20 a 50 mg/L até em descartes industriais, em concentrações que podem variar de 12000 a 35000 mg/L. Conforme a *Water Environmet Federation - WEF* (1995), este valor de concentração de sulfato em esgotos domésticos pode variar de 30 a 250 mg/L.

O sulfato encontra-se em baixa quantidade presente no cimento através do gesso, cuja finalidade é retardar o endurecimento do concreto quando aplicado. O teor de sulfato encontrado no concreto depende do consumo de cimento e do teor de gesso do cimento. Em um concreto com massa específica de 2300kg/m³ com 350 kg de cimento por metro cúbico amassado com um cimento de 3% de gesso dará um teor máximo de sulfato de 0,46% por peso total do concreto. Sendo este, portanto, considerado como limite para o teor de íons sulfatos encontrados no concreto (MAZER *et al*, 2014).

A agressividade ambiental está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre a estrutura de concreto. A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta as classes de agressividade ambiental relacionadas ao risco de deterioração da estrutura, conforme mostra o Quadro 5.

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

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

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

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

Quadro 5: Classes de Agressividade Ambiental
Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Ainda com base na NBR 6118 (ABNT, 2014), o desempenho da durabilidade da estrutura, frente a classe de agressividade ambiental, deve atender a parâmetros mínimos, conforme mostra o Quadro 6.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

NOTAS

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na 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.

Quadro 6: Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto
Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014)

Para concretos expostos a soluções contendo sulfato, a NBR 12655 (ABNT, 2006) apresenta valores de avaliação conforme o Quadro 7.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO ₄) presente na água (ppm)	Máxima relação a/c, em massa, para concreto com agregado normal*	Mínimo f _{ck} (para concreto com agregado normal ou leve)
Fraca	0 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa***	> 0,20	> 1500	0,45	40

*Baixa relação a/c ou elevada resistência podem ser necessários para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.
**Água do mar.
***Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Quadro 7: Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos
Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2006)

A norma europeia *CEB-FIP Model Code 1990* (1993) proporciona meios para avaliar o grau de agressividade química da classe de exposição, fornecendo valores limites para os teores de agentes agressivos e classificando o nível de agressividade química, de acordo com o Quadro 8:

Classe de agressividade	pH	CO ₂ agressivo mg/L	Amônia NH ₄ ⁺ mg/L	Magnésio Mg ²⁺ mg/L	Sulfato SO ₄ ²⁻ mg/L	Sólidos dissolvidos mg/L
I	>6	< 20	<100	<150	<400	>150
II	5 – 5,9	20 – 30	100 – 150	150 – 250	400 – 700	150 – 50
III	4,5 - 5	30 – 100	150 – 250	250 – 500	700 - 1500	<50
IV	< 4,5	>100	>250	>500	>1500	<50

Quadro 8: Classificação da agressividade ambiental
Fonte: CEB-FIP (1993)

A SANEPAR, Companhia de Saneamento de Paraná, através do Termo de Referência para Elaboração e Apresentação de Projetos Estruturais, define as premissas básicas para a elaboração de projeto de estruturas em concreto armado ou protendido para obras de saneamento, tanto de Sistemas de Abastecimento de Água como Sistemas de Tratamento de Esgotos. Estas premissas estão especificadas no Quadro 9.

GRUPO	ELEMENTO CONSTRUTIVO	CLASSE AMBIENTAL	CLASSE DE CONCRETO	FATOR a/lc	COBRIMENTO (cm) LAJE, VIGA, PILAR, PAREDE	DIMENSÕES MÍNIMAS (cm)				
						LAJES C/VIGAS	LAJES S/VIGAS	VIGAS	PILARES	PAREDES
ÁGUA	BASE PARA TANQUES DE PRODUTOS QUÍMICOS									
	CAIXAS DE DISTRIBUIÇÃO									
	CAPTAÇÃO DE ÁGUA BRUTA									
	DESARENADOR									
	ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA									
	ELEVATÓRIA DE ÁGUA TRATADA									
	ELEVATÓRIA DE RECIRCULAÇÃO	IV	C40	0.45	4.5	15	18	20	25	20
	ETA (CALHA PARSHALL, FLOCULADOR, DECANTADOR, FILTRO, CÂMARA DE CONTATO)									
	ETL (EE LODO, RECALDIRECALF, ADENSADOR DE LODO, DESÁGUE DE LODO)									
	PAREDES DIVISÓRIAS DE LAGOA									
	RESERVATÓRIO DE ÁGUA TRATADA OU BRUTA									
	TANQUES DE PRODUTOS QUÍMICOS									
	BASES DE APOIOS E BOMBAS									
	BLOCOS DE ANCORAGEM									
	CAIXAS DE VALVULAS	II	C25	0.60	2.5	10	15	15	15	17
	EDIFICAÇÕES (CASA DE QUÍMICA, CASA DO OPERADOR, GUARITA, LABORATÓRIO, CASA DE COMPRESSORES, ADMINISTRATIVOS)									
MUROS DE ARRIMOS										
ADENSADOR DE LODO										
CAIXAS DE DISTRIBUIÇÃO										
CALHA PARSHALL										
CLARIFICADOR DE LODO										
DECANTADORES										
DESARENADORES										
DESINFECÇÃO UV										
ELEVATÓRIAS DE ESGOTO BRUTO										
ELEVATÓRIAS DE RECIRCULAÇÃO E DE LODO	IV	C40	0.45	4.5	15	18	20	25	20	
EMISSÁRIOS										
FILTROS										
FLOTADOR										
GRADEAMENTO										
REACTORES RALF OU UASB										
RESERVATÓRIO DE ACÚMULO										
SISTEMAS DE ENTRADA										
TANQUES DE EQUALIZAÇÃO										
BASES DE APOIOS E BOMBAS										
BLOCOS DE ANCORAGEM										
CAIXAS DE MANOBRA, PASSAGEM, VALVULAS										
EDIFICAÇÕES (GUARITA, LABORATÓRIO, ADMINISTRATIVOS, CASAS DE QUÍMICA, DO OPERADOR, DE COMPRESSORES, SOPRADORES, DE PREPARO DE POLÍMERO)										
SOPRADORES, DE PREPARO DE POLÍMERO										
LEITOS DE SECAGEM E DRENAGEM										
MUROS DE ARRIMOS	II	C25	0.60	2.5	10	15	15	15	17	
PÁTIO DE CURA										
PREDIO DE SECAGEM DE LODO (CENTRIFUGA)										

Quadro 9: Classificação dos Elementos Estruturais para Obras de Saneamento em Concreto Armado de Acordo com a NBR 6118
Fonte: SANEPAR

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de se atingir os objetivos específicos deste trabalho, foram realizados dois ensaios de laboratório, um para determinação do teor de sulfato no concreto e outro para análise da porosidade da amostra, e ambos são descritos a seguir.

3.1. COLETA DAS AMOSTRAS

As amostras ensaiadas foram coletadas Estação de Tratamento de Esgoto Santa Quitéria, localizada na sub-bacia do Rio Barigui que atende, de forma total ou parcial, a 18 bairros de Curitiba, além dos municípios de Araucária e Campo Magro.

O tratamento do esgoto nesta estação é realizado por meio de processos físicos, químicos e biológicos, que removem sólidos, matéria orgânica e nutrientes. O lodo gerado passa por processos de adensamento e desidratação, sendo enviado para estabilização e posterior destinação final.

A ETE Santa Quitéria foi inaugurada em 1998, atinge 75% de eficiência na remoção de DBO e DQO, com capacidade de tratar uma vazão média de 520 L/s podendo chegar a 600 L/s. Possui processo de tratamento anaeróbio, com seis reatores anaeróbicos de leito fluidizado, do tipo UASB, ilustrados na Figura 14, e sistema de pós tratamento por flotação, o qual foi inaugurado em 2010. Os efluentes são lançados no Rio Barigui, aproximadamente a 40 km de sua foz, quando encontra o Rio Iguaçu no município de Araucária.

A ETE conta ainda com lavadores de gases para controle de maus odores. Durante um tempo, os tanques dos reatores foram tampados, verificado na Figura 14, como tentativa de minimizar os maus odores, mas visto que o concreto estava sendo rapidamente deteriorado, foram destampados.



Figura 14: Reatores do tipo UASB

Fonte: <http://site.sanepar.com.br/> Acesso em: 05/12/16

Em visita à esta Estação de Tratamento de Esgoto foram retiradas quatro amostras, uma de cada tanque, da parte deteriorada do concreto de um reator UASB, que na data da visita estava desativado para limpeza de rotina. Na figura 15 tem-se o *layout* da ETE com indicação do local de coleta, bem como na Figura 16, os tanques de coleta das amostras.



Figura 15: *Layout* da ETE

Fonte: Google Earth. Acesso em: 05/12/16



Figura 16: Tanques de coleta das amostras
Fonte: O autor (2016)

Os elementos estruturais dos tanques que compõe o reator estavam visivelmente danificados, como ilustrado na Figura 17, e por isso foi possível a retirada das amostras manualmente.



Figura 17: Retirada das amostras
Fonte: O autor (2016)

Em análise à Figura 18, é possível perceber o quão danificado estava os tanques de retirada das amostras, pois é possível ver a corrosão acelerada das armaduras.

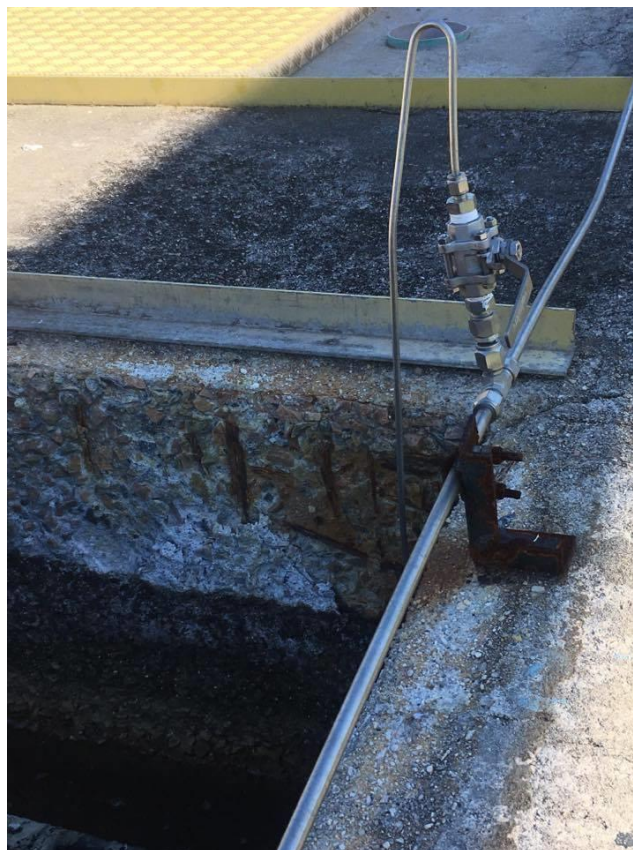


Figura 18: Corrosão das armaduras
Fonte: O autor (2016)

As amostras coletadas foram devidamente embaladas e encaminhadas para o laboratório de Química do Cimento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, sede Ecoville, onde foram realizados os ensaios listados abaixo.

3.2. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SULFATO

O ensaio químico para determinação do teor de íons sulfatos nas amostras de concreto foi realizado de acordo com uma adaptação da normativa “4500-SO₄ – Sulfate” da *Standard Methods Committee* (1997) para águas residuais. O método consiste em:

1. Tomar uma porção de 1g de concreto moído e seco, de modo que passe na peneira de 0,15 mm, como ilustrado na Figura 19.



Figura 19: Amostras de concreto a serem ensaiadas
Fonte: O autor (2016)

2. Adicionar 25 ml de água destilada fria na proveta, e após isso, 5 ml de ácido clorídrico, aos poucos, mexendo com uma haste de vidro. Quando adicionado ácido clorídrico à solução, o cimento presente na amostra é solubilizado.
3. Adicionar mais 50 ml de água destilada e aquecer abaixo da ebulição. Este processo pode ser visto na Figura 20.



Figura 20: Aquecimento da mistura de pó de concreto, água e ácido clorídrico
Fonte: O autor (2016)

4. Filtra-se o material utilizando papel filtro de porosidade média em um funil, e lava-se o resíduo com água quente. Nesta etapa, o cimento solubilizado é todo retirado.
5. Acrescentar água destilada até completar 250 ml. Na Figura 21 é possível visualizar as etapas 4 e 5.



Figura 21: Solução filtrada utilizando papel filtro
Fonte: O autor (2016)

6. O material deve ser aquecido até a ebulição.
7. Adiciona-se, gota a gota, uma solução quente de 10 ml de cloreto de bário e em seguida aquece-se a solução até a ebulição. O cloreto de bário reage com os íons sulfatos, formando sulfato de bário, um precipitado branco que também pode ser observado nos copos de Becker 4, 3 e 1, expostos na Figura 21.
8. Portanto, se existirem sulfatos, haverá produção de um precipitado, e continua-se a análise. Deixa-se o recipiente em descanso, tampado, por 24 horas. Filtra-se a amostra com papel filtro de baixa porosidade, lavando-se com água quente até o desaparecimento dos cloretos na água de lavagem.
9. Uma vez transferindo os filtros com o material retido para os cadinhos, os mesmos são colocados em forno-mufla a 800°C e calcinados por uma hora. Pesa-se a amostra de modo a obter o teor máximo de sulfato. Na Figura 22 tem-se o resultado deste processo.



Figura 22: Amostras de sulfato de bário após calcinação
Fonte: O autor (2016)

Para determinar a porcentagem de trióxido de enxofre na amostra, utilizou-se a equação 15,

$$SO_3(\%) = \frac{34,3 \times M_{calcinada}}{M_{inicial}} \quad (15)$$

Onde:

$M_{calcinada}$: massa da amostra pesada após o ensaio, em gramas;

$M_{inicial}$: massa inicial da amostra antes do ensaio, em gramas;

$SO_3(\%)$: porcentagem de trióxido de enxofre na amostra.

3.3 ANÁLISE DA POROSIDADE DA AMOSTRA

Para análise da porosidade da amostra foi utilizado o método de Porosimetria por Injeção de Mercúrio, que consiste em obter a distribuição dos diâmetros dos poros a partir dos dados pressão-volume durante a penetração de mercúrio em um material poroso. A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Por isso, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele (Laboratórios de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, 2016).

O equipamento utilizado foi o Poremaster 33, da Quantachrome, que pode ser visualizado na Figura 23, e cujos dados técnicos estão no Quadro 10.



Figura 23: Quantachrome Poremaster 33
Fonte: <http://www.quantachrome.com/> Acesso em: 05/12/16

DADOS TÉCNICOS DO EQUIPAMENTO
Fabricante: Quantachrome Modelo: Poremaster 33 Gás: Ar sintético a 60 psi Temperatura do Ambiente: 20°C
Leitura de Pressão pelo Equipamento
Pressão Mínima: 0,2 a 50 psi Pressão Máxima: 20 a 33000 psi
Diâmetro Máximo da Célula
d: 10 mm h: 20 mm
Dados do Mercúrio
Ângulo de Contato: 140° Tensão Superficial: 480 dynes/cm

Quadro 10: Dados técnicos do Poremaster
Fonte: Quantachrome Instruments (2013)

O ensaio foi realizado em uma amostra de 0,17g. O procedimento consiste em colocar a amostra num recipiente e aplicar uma pressão baixa ao líquido, que permite o preenchimento da maioria dos poros grandes. Ao se aumentar a pressão, os poros pequenos também são preenchidos. Com os valores do volume de poros do concreto penetrado pelo mercúrio e com a respectiva pressão aplicada, uma curva porosimétrica é obtida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Avaliar e determinar o grau de agressividade do ambiente em que as estruturas de concreto serão expostas é extremamente importante para correto dimensionamento e determinação das características de projeto, de modo a assegurar a durabilidade estrutura. A construção de uma estrutura durável está diretamente ligada a questões econômicas, visto que interrupções do sistema para reparo estrutural geram uma diminuição no rendimento.

O ensaio de determinação do teor de sulfato em amostra de concreto realizado neste trabalho resultou em formação de um precipitado branco, o sulfato de bário, que com a aplicação da equação 15, foi calculado o teor de trióxido de enxofre. Os resultados obtidos com este ensaio são descritos da Tabela 1.

Tabela 1: Resultado do Ensaio de Determinação do Teor de Sulfato

	massa inicial (g)	massa calcinada (g)	SO ₃ (%)
Amostra 1	1,115	0,252	7,75
Amostra 2	1,110	0,589	18,20
Amostra 3	1,144	0,298	8,93
Amostra 4	1,107	0,221	6,85

Fonte: O autor (2016)

Conforme Lima (2010), existem dois erros que podem ocorrer em uma medição: o erro estatístico, que é o erro que resulta de uma variação aleatória no resultado da medição que, por algum motivo, não podem ou não são controlados, e o erro sistemático, relacionado à calibração do instrumento, a efeitos do ambiente sobre o experimento, às falhas de procedimento ou devido à imperícia do observador.

Portanto, com base na Tabela 1, provavelmente no ensaio da amostra 2, houve algum erro sistemático, visto que a porcentagem de sulfato está bem acima das outras amostras. Com uma análise de dados espúrios, verificou-se que a média da porcentagem de sulfatos nos tanques dos reatores UASB desta Estação de Tratamento de Esgoto é de 7,84%.

Apesar de não existir uma norma que estipule a quantidade máxima de íons sulfatos aceitáveis para o concreto, conforme dito anteriormente, existem íons sulfatos presente no cimento, por isso, toda amostra de concreto terá um valor mínimo deste composto. Para este ensaio, o valor máximo aceitável seria 0,46%, e como visto na Tabela 1, todas as amostras ensaiadas obtiveram valores bem acima do valor limite.

Neste estudo, desejou-se analisar a quantidade de sulfato presente no concreto, e não no esgoto que a estrutura mantém contato direto. Mas, Rheinheimer e Khoe (2013) realizaram um ensaio de quantificação da concentração de sulfato na amostra de esgoto, cuja coleta foi realizada no mesmo local, e o resultado foi menor que 200 mg/l de SO_4^{2-} , com diluição ajustada.

Segundo Rheinheimer e Khoe (2013), o método escolhido para o ensaio foi do turbidimétrico, devido a rapidez de execução, disponibilidade dos equipamentos e ampla aceitação. Porém, o laudo do ensaio de concentração de sulfato na amostra de esgoto teve algumas restrições. O laboratório que realizou o ensaio declarou que para amostras de água tratada o parâmetro de quantificação de sulfato parte de 10 mg/l, porém este limite sobe para 100 mg/l quando se trata de água residual. Tentou-se uma filtração para clarificação da amostra, porém, sem sucesso. Foi preciso diluir a amostra em 20 vezes para realização do ensaio, para diminuição da turbidez da mesma (RHEINHEIMER, KHOE; 2013). O laudo do ensaio encontra-se no Anexo A.

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), como já apresentado no Quadro 7, uma quantidade de sulfato presente na água menor que 200 mg/L indica uma condição de exposição fraca ou moderada em função da agressividade. Para a norma europeia, quadro 8, esta quantidade de sulfato enquadra-se na classe I de agressividade ambiental. Para ambas normas, este valor confere que o risco de deterioração da estrutura é insignificante ou pequeno.

Apesar da concentração de íons sulfato ser compatível com os valores da literatura, sabe-se que as Estações de Tratamento de Esgoto são ambientes cuja agressividade é muito forte, visto que o esgoto carrega materiais dos mais diversos, que podem reagir e levar a formação de compostos nocivos ao concreto. Portanto, de acordo com o Quadro 5, mostrado anteriormente, as ETE deveriam ser consideradas ambientes industriais quimicamente agressivos, cujo risco de deterioração da estrutura é elevado, ou seja, classe IV de agressividade ambiental.

Como já apresentado, o Quadro 9 expõe a classificação dos elementos estruturais para obras da Sanepar, e classifica os reatores como classe ambiental IV, cuja agressividade é muito forte, e o risco de deterioração é elevado. Esta classificação condiz com a realidade. Ainda de acordo com o Quadro 9, a classe exigida do concreto é C40, com cobrimento das armaduras de 4,5 centímetros. Ainda

assim, outras especificações deveriam ser feitas, como o uso de cimentos resistentes a sulfatos.

Com base nesta análise, notou-se que a literatura não condiz com a realidade, pois como analisado durante a inspeção visual, observou-se uma total deterioração da estrutura de concreto armado e uma elevada quantidade de sulfato presente na amostra de concreto, que são indicativos que a agressividade é alta, mesmo com uma concentração de sulfatos no esgoto considerada dentro do padrão.

Não se sabe qual o ano da construção destes reatores, pois esta ETE passou por algumas obras de ampliação. Mas, se os projetos foram elaborados com base nos requisitos do quadro 9 pode-se afirmar que no mínimo 4,5 centímetros do concreto já foi totalmente deteriorado, visto que, com base na figura 18, a corrosão da armadura encontra-se em estado avançado.

Um questionamento válido é se as normas referentes à concentração de sulfatos na água apresentam valores superestimados ou se é viável usá-las para águas residuais.

Como visto anteriormente, o desenvolvimento do espaço poroso do concreto não depende somente da sua composição, mas também das condições de cura e de exposição. Pode haver ainda alteração na porosidade em decorrência de reações químicas entre as substâncias presentes no meio ambiente e no concreto.

Pêsoa *et al.* (2014) realizaram experimentos em corpos de prova de concreto de 30 MPa de resistência à compressão para determinação da porosidade volumétrica. Este ensaio foi baseado com o ensaio apresentado na NBR 9778 (ABNT, 2005) - Absorção de água, índice de vazios e massa específica em argamassa e concreto endurecido. O resultado obtido foi uma porosidade de 2,10%.

Haja vista que o ataque por íons sulfatos aumenta a porosidade da estrutura de concreto, desejou-se comparar a porosidade da amostra de concreto atacada por íons sulfatos com uma amostra que não sofreu ataque. Em análise aos resultados do ensaio de Porosimetria por Injeção de Mercúrio, verificou-se que porosidade total da amostra de concreto atacada por íons sulfatos é de aproximadamente 12,76%. O relatório completo pode ser visto no Anexo B.

Apesar de não saber a resistência do concreto ensaiado, de acordo com o Quadro 9, deveria ser de 40 MPa, e a porosidade não deveria ser muito acima de 2,10%, como o concreto avaliado por Pêsoa *et al.* (2014). Com isso, pode-se afirmar que houve um aumento considerável na porosidade do concreto.

Durante o ensaio de porosimetria, para que haja total preenchimento dos poros com mercúrio, precisa-se aumentar consideravelmente a pressão aplicada no líquido. A relação entre pressão aplicada no mercúrio e o diâmetro dos poros pode ser vista na Figura 24. A linha tracejada consiste na divisão entre baixa e alta pressão, e este valor corresponde a 31,074 PSI.

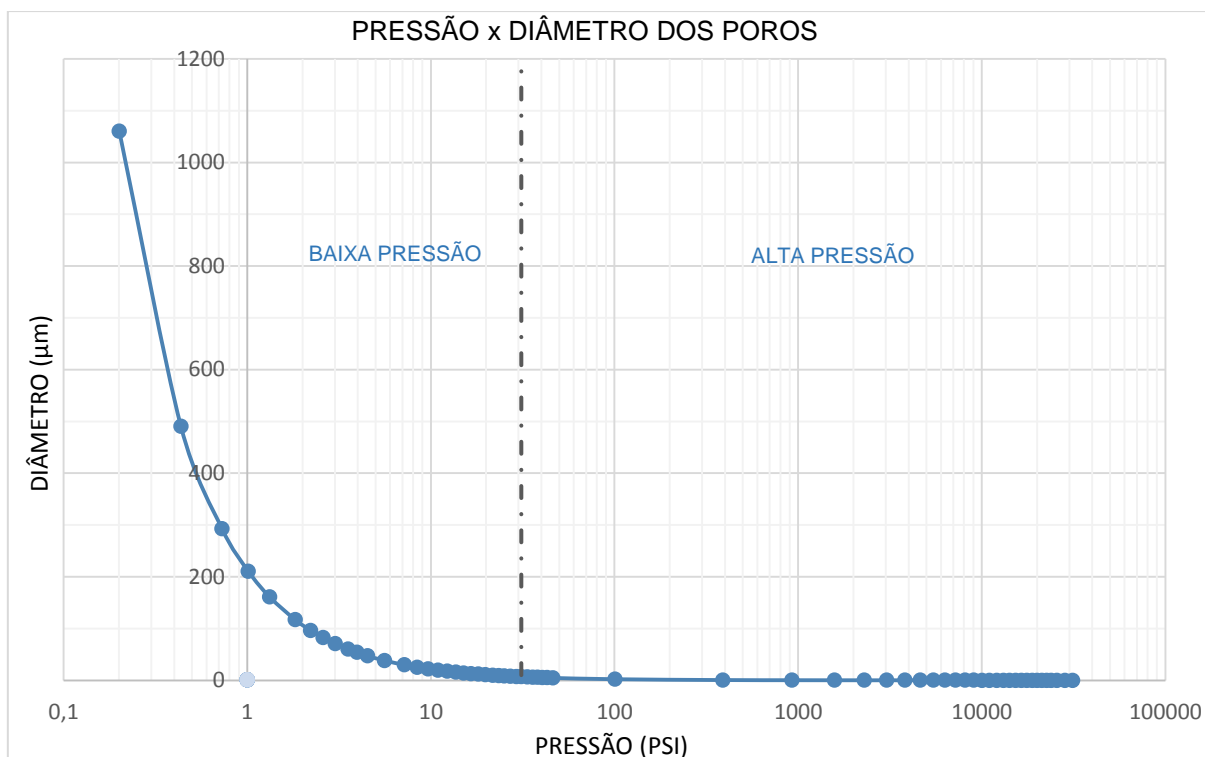


Figura 24: Pressão aplicada ao mercúrio versus diâmetro do poro
Fonte: O autor (2016)

Com base na Figura 24 e no relatório do ensaio, que pode ser visto no anexo C, verificou-se que 43,75% dos poros foram preenchidos com o mercúrio a uma baixa pressão, e assim, para preencher os outros 56,25% precisou aplicar alta pressão, que chegou a 31304,36 PSI. Com isso, conclui-se que maior parte dos poros são muito pequenos.

Outra análise realizada foi a relação entre os diâmetros dos poros e o volume intrudido de mercúrio, que pode ser observado na Figura 25. Assim sendo, verifica-se que quanto maior o volume de mercúrio intrudido, menor é o diâmetro dos poros.

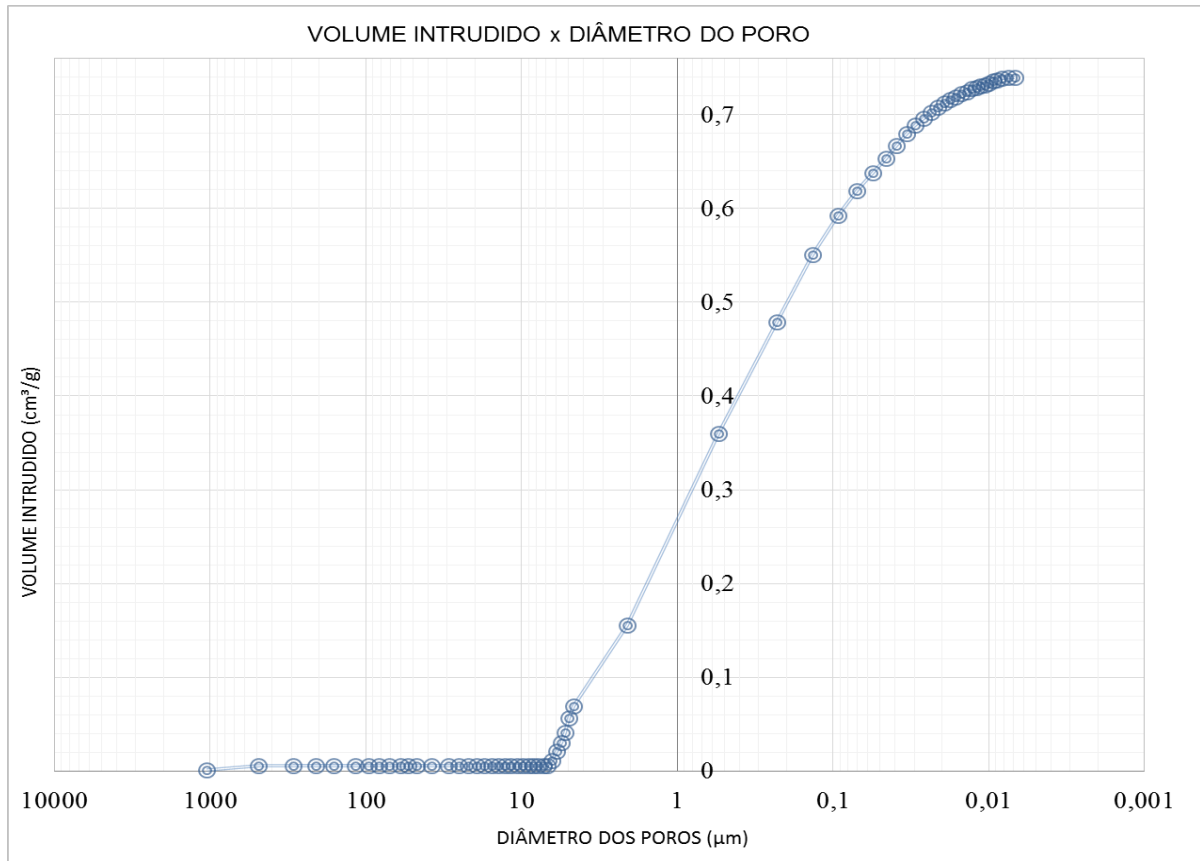


Figura 25: Volume intrudido versus diâmetro dos poros
 Fonte: O autor (2016)

Para os gráficos ilustrados nas Figuras 24 e 25 foi necessário aplicar uma escala logarítmica no eixo horizontal para uma melhor representação. A partir delas, pode-se concluir que os poros com diâmetros maiores são primeiramente preenchidos com uma pressão baixa, e para total preenchimento dos poros, necessita-se um aumento considerável de pressão. Conseqüentemente, quanto maior o volume de mercúrio intrudido na amostra, menor são os diâmetros dos poros.

5. CONCLUSÕES

As obras na área de saneamento buscam sempre a melhoria e qualidade de atendimento da população, no intuito de se evitar a propagação de doenças de veiculação hídrica. As estruturas de concreto armado das estações de tratamento de esgoto estão em contato constante com agentes nocivos a este material.

Dentro deste contexto, o trabalho realizado buscou avaliar as manifestações patológicas causadas especialmente por íons sulfatos, e pode-se concluir que os danos são grandes, visto que a estrutura de concreto armado estava em avançado estado de deterioração.

O ensaio de determinação de teor de íons sulfatos, que para um concreto que não sofreu ataque deveria ser na média de 0,5%, apresentou um valor muito maior, de 7,84%. Um dos danos causados ao concreto pelo ataque aos íons sulfatos é o aumento da porosidade, que pôde ser constatado com o ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio um aumento de 10%, em média.

Através dos resultados encontrados, verificou-se que os valores da concentração de sulfato no esgoto condizem com a literatura, mas o risco de deterioração não é baixo, para casos específicos de Estações de Tratamento de Esgoto, como as normas afirmam.

Portanto, é notória a necessidade de uma norma que estipule uma quantidade máxima aceitável para presença de íons sulfato no concreto, e uma norma para estruturas em contato com águas residuais, pois as normas utilizadas para esgoto e água são as mesmas, o que não é cabível, visto que as propriedades químicas dos dois fluidos são bastante diferentes.

Foi possível perceber a necessidade de estudos mais aprofundados e o desenvolvimento de uma pesquisa mais detalhada. Sugere-se analisar em trabalhos futuros a existência simultânea de ataques de diversas naturezas, visto que uma manifestação patológica dificilmente ocorre por uma causa isolada. Outra sugestão é a viabilidade do uso de revestimento com pastilhas de vidro, que apresentam ótimo desempenho em relação à umidade e são resistentes a produtos químicos.

Portanto, através dos resultados obtidos, verificou-se a necessidade de estudos aprofundados neste campo da Engenharia Civil, com desenvolvimento de novas normas que sejam adequadas às reais problemáticas pertinentes às situações que envolvem este assunto.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, Rosa M. V. **Contribuição para o Estudo de Odores em Estação de Tratamento de Águas Residuais Urbanas**. 2006. 299 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655:2006 Concreto de Cimento Portland – Preparo, Controle e Recebimento - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014 Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009 Agregados para Concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

BARÉA, Luis César. **RALF, Reator Anaeróbio de Manto de Lodo e Fluxo Ascendente reduzindo custos e economizando energia no Tratamento de Esgotos**. Curitiba/ PR, 2006.

BORSOI, Z.; CAMISÃO, M. L.; LANARI, N.; TORRES, S.; GOMES, S. M. **Tratamento de Esgoto: Tecnologias Acessíveis**. Informe Infraestrutura do BNDES. 1997.

CAMPOS, J.R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**, Editora Pini. São Paulo, 1988.

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

COSTA, Rodrigo M. **Análise de Propriedades Mecânicas do Concreto Deteriorado Pela Ação de Sulfato Mediante Utilização do UPV**. 2004. 246 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

COUTINHO, Joana de S. **Materiais de Construção 1; Durabilidade – Ataque por Sulfatos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto, Portugal, 2001.

CRAMMOND, N. J.; HALLIWELL, M. A.; **Assessment of the Conditions required for the Thaumassite form of sulphate attack**. Simpósio MRS - Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems; Editores: K.L.Scrivener & J.F.Young, E&Fn SPON, 1997.

HARTMANN, C. M.; CARDOSO, F. A.; LUPATINI, G.; Dias, C. O.; Andreoli, C. V. **Avaliação de Alternativas para Redução de Sulfeto de Hidrogênio na Corrente Líquida de Estação Anaeróbia de Tratamento de Esgoto**. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife, 2009.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 1. ed. São Paulo: PINI (IPT), 1986.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

JIANG, Guangming; WIGHTMAN, Elaine; DONOSE, Bogdan C.; YUAN, Zhiguo; BOND, Philip L.; KELLER, Jurg. **The Role of Iron in Sulfide Induced Corrosion of Sewer Concrete**. 2013. Journal Science Direct. Editora Elsevier.

Laboratórios de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas. (2016). Pesquisa, porosimetria por injeção de mercúrio. Consultada em www.lmpt.ufsc.br no dia 28/10/2016.

LIMA, Terezinha S. **Introdução à Teoria dos Erros**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA, 2010.

MAMLOUK, Michael S.; ZANIEWSKI, John P. **Materials for Civil and Construction Engineers**. 3ª Edição. Editora Pearson, 2010.

MAZER, W.; MACIOSKI, G.; SOTO, N. T. A.; BAETTKER, E. C. **Determinação do teor de íons sulfato em estruturas de concreto**. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.

MAZER, W.; DE LIMA, A. J. M. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto – Notas de Aula**. UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba/ PR, 2008.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Monteiro. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª Edição. São Paulo: Editora IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, 2008.

MELO, Sandra K. **Estudo da Formação da Etringita Tardia em Concreto por Calor de Hidratação do Cimento**. 2010. 150 f. Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Construção Civil – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MOCKAITIS, G. **Redução de sulfato em biorreator operado em batelada e batelada alimentada seqüenciais contendo biomassa granulada com agitação mecânica e “draft-tube”**. São Carlos, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1982.

PAULON, V. A. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

PÊSSOA, José Renato de Castro; DOMINGUÉZ, Joel Sanchez; DE CARVALHO, Gil; DE ASSIS, Joaquim Teixeira. **Porosidade do Concreto Determinada por Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem**. Instituto Politécnico, UERJ. Nova Friburgo, Rio de Janeiro, 2014.

PINHEIRO-ALVES, Maria T.; GOMÀ, Ferran; JALALI, Said. **Um Cimento mais Sustentável Frente a um Ataque Severo por Sulfatos**. 3º Congresso Nacional da Construção. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2007.

PINTO, J.; TAKAGI, E. M. Sistemas de impermeabilização e proteção para obras de saneamento. **Revista Concreto e Construções** (IBRACON), São Paulo, n. 47, p. 73-79. 2007.

QUANTACHROME INSTRUMENTS. **Poremaster Series – Automated Mercury Porosimeters**. 2013

RHEINHEIMER, Bianca; KHOE, Sarah Shima. **Ataque por Sulfatos em Estações de Tratamento de Efluentes**. 2013. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTHANAM, Manu; COHEN, Menashi D.; OLEK, Jan. Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms. **Cement and Concrete Research**, n. 33, 2003.

SAWYER, Clair N. MCCARTY, Perry L., PARKIN, Gene F. **Chemistry for Environmental Engineering and Science**. 5ª edição. McGraw-Hill Companies. New York, 2003.

SHARMA, Keshab; DERLON, Nicolas; HU, Shihu; YUAN, Zhiguo. **Modeling the pH Effect on Sulfidogenesis in Anaerobic Sewer Biofilm**. 2013. Journal Science Direct. Editora Elsevier.

SKALNY, Jan; MARCHAND, Jacques; ODLER, Ivan. **Sulfate Attack on Concrete**. 1ª Edição. London and New York: Son Press, 2002.

SOUZA, Rui B. de. **Suscetibilidade de Pastas de Cimento ao Ataque por Sulfatos – Método de Ensaio Acelerado**. 2006. 131 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.
4500- SO₄ – Sulfate. Standard Methods Committee, 1997.

THOMAZ, Eduardo C. S. **Ataque de Sulfatos ao Concreto de Cimento Portland.**
Notas de Aula – Instituto Militar de Engenharia. Disponível em:
[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimentos.h](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimentos.htm)
tm>. Acesso em: 30/05/2016

VERSIANI, Betina M. **Desempenho de um Reator UASB submetido a Diferentes Condições Operacionais Tratando Esgotos Sanitários do Campus da UFRJ.**
2005. 88f. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

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

ANEXO A – Quantificação da Concentração de Sulfatos em Amostra de Esgoto

RELATÓRIO DE ENSAIOS LABORATORIAIS

Nº.: 09763/13 - 00

CLIENTE

Cliente: SARAH CHIMA KHOE

Proposta: 01413 /13

Endereço: Rua Inocêncio Milani nº 502 - São Braz
Curitiba - PR - C.E.P.: 82300-620

DADOS DA AMOSTRA

Data e Hora da Amostragem: 11/11/2013 14:00
Ponto de Amostragem: Entrada da Entrada do Tratamento
Responsável pela Amostragem: Cliente
Responsável pelo Transporte: Cliente
Data de Fabricação: N.I.*
Embalagem: frasco plástico

Data e Hora do Recebimento: 11/11/2013 15:45
Tipo de Amostragem: Simples
Tipo de Amostra: Efluente Bruto
Procedimento de Amostragem: --
Validade: N.I.*
Lote: N.I.*

DADOS DA(S) ANÁLISE(S)

Data de Início: 18/11/2013 Data do Término: 18/11/2013
Objetivo: Análises laboratoriais em amostra de Efluente - Sem comparativo com legislação vigente.

RESULTADOS

Análises Físico-Químicas

Parâmetro	Método	LQ(*)	Resultado	VMP(?)	Expressão
Sulfato	SM 4500-SO4-2 E	200,0	< 200,0	-	mg/L

NOTAS

(*)L.Q.: Limite de Quantificação do Método Analítico Utilizado / (?)VMP: Valor Máximo Permitido / N.I.: Dado(s) não informado(s) pelo Solicitante

METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)

APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22 ed. 2012.

Curitiba, 19 de Novembro de 2013

Abner Weigert
Tcg^o Químico Ambiental
CRQ 09201766 PR

Fonte: Rheinheimer; Khoe (2013)

ANEXO B – Relatório de Porosidade

Report date: 10/11/2016

Merged File

QUANTACHROME CORPORATION
 QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS® DATA REPORT
 VERSION 8.01

SAMPLE ID Jhenifer SANEPAR FILE NAME S6A1101H_Merged.PRM
 SAMPLE WEIGHT 0.1723 grams BULK SAMPLE VOLUME 1.0000 cc
 SAMPLE DESCRIPTION Wellington
 COMMENTS
 HG SURFACE TENSION 480.00 erg/cm² HG CONTACT ANGLE
 (I)140.00°,(E)140.00°
 MINIMUM DELTA VOL. 0.000 % FS MOVING POINT AVG. 11 (Scan Mode)
 OPERATOR Gustavo Mercury volume normalized by sample weight.

Porosity Summary

Sample (bulk) volume = 1.0000 [cc]
 Interparticle filling pressure limit = 50.0000 [PSIA]
 Interparticle filling poresize limit = 4266.4438 [nm]

Intruded volume (interparticle) = 0.0137 [cc]
 Total interparticle porosity = 1.3667 [%]

Intruded volume (intraparticle) = 0.1139 [cc]
 Total intraparticle porosity = 11.3925 [%]

Total intruded volume = 0.1276 [cc]
 Total porosity = 12.7592 [%]

He density = 2.0000 [g/cc]
 Theoretical porosity = 91.3850 [%]

ANEXO C – Distribuição do Tamanho dos Poros por Volume Intrudido

Report date: 10/11/2016

Merged File

QUANTACHROME CORPORATION
 QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS® DATA REPORT
 VERSION 8.01

SAMPLE ID Jhenifer SANEPAR FILE NAME S6A1101H_Merged.PRM
 SAMPLE WEIGHT 0.1723 grams BULK SAMPLE VOLUME 1.0000 cc
 SAMPLE DESCRIPTION Wellington
 COMMENTS
 HG SURFACE TENSION 480.00 erg/cm² HG CONTACT ANGLE
 (I)140.00°,(E)140.00°
 MINIMUM DELTA VOL. 0.000 % FS MOVING POINT AVG. 11 (Scan Mode)
 OPERATOR Gustavo Mercury volume normalized by sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(µm-g)]	-dV/d(log d) [cc/g]
0.201	1.060E+03	0.0017	0.0017	0.23	7.353E-06	1.926E-02
0.435	4.906E+02	0.0059	0.0042	0.80	1.480E-06	1.264E-03
0.729	2.927E+02	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
1.014	2.105E+02	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
1.326	1.608E+02	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
1.825	1.169E+02	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
2.212	9.642E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
2.592	8.229E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
3.021	7.060E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
3.541	6.025E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
3.963	5.383E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
4.526	4.713E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
5.586	3.819E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
7.174	2.974E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
8.420	2.533E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
9.653	2.210E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00

10.947	1.949E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
12.287	1.736E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
13.668	1.561E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
15.090	1.414E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
16.557	1.288E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
18.109	1.178E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
19.842	1.075E+01	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
21.754	9.806E+00	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
23.411	9.112E+00	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
25.107	8.497E+00	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
27.139	7.860E+00	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
29.274	7.287E+00	0.0059	0.0000	0.80	0.000E+00	0.000E+00
31.074	6.865E+00	0.0059	0.0000	0.80	2.461E-03	4.006E-02
33.453	6.377E+00	0.0108	0.0048	1.45	1.750E-02	2.594E-01
35.830	5.954E+00	0.0215	0.0108	2.91	2.624E-02	3.606E-01
38.146	5.592E+00	0.0304	0.0089	4.11	2.689E-02	3.476E-01
40.450	5.274E+00	0.0408	0.0104	5.51	4.317E-02	5.276E-01
42.928	4.969E+00	0.0567	0.0158	7.65	4.422E-02	5.059E-01
46.121	4.625E+00	0.0691	0.0125	9.33	3.095E-02	3.335E-01
100.744	2.117E+00	0.1553	0.0862	20.97	5.511E-02	2.924E-01
388.792	5.487E-01	0.3603	0.2050	48.65	2.874E-01	3.426E-01
925.608	2.305E-01	0.4793	0.1190	64.72	5.890E-01	3.107E-01
1580.918	1.349E-01	0.5508	0.0715	74.38	9.321E-01	2.882E-01
2291.096	9.311E-02	0.5927	0.0419	80.04	1.105E+00	2.371E-01
3040.446	7.016E-02	0.6192	0.0265	83.62	1.241E+00	2.011E-01
3817.598	5.588E-02	0.6381	0.0188	86.16	1.450E+00	1.878E-01
4625.759	4.612E-02	0.6537	0.0156	88.28	1.755E+00	1.874E-01
5458.333	3.908E-02	0.6672	0.0135	90.09	2.102E+00	1.904E-01
6316.053	3.377E-02	0.6793	0.0121	91.73	2.324E+00	1.812E-01
7199.420	2.963E-02	0.6886	0.0093	92.98	2.194E+00	1.502E-01
8113.129	2.629E-02	0.6960	0.0074	93.98	2.269E+00	1.378E-01
9057.366	2.355E-02	0.7021	0.0061	94.81	2.227E+00	1.212E-01
10030.074	2.127E-02	0.7075	0.0054	95.54	2.535E+00	1.247E-01
11032.454	1.934E-02	0.7123	0.0048	96.19	2.351E+00	1.048E-01

12063.319	1.768E-02	0.7157	0.0034	96.65	1.733E+00	7.054E-02
13121.288	1.626E-02	0.7184	0.0027	97.01	2.559E+00	9.657E-02
14208.054	1.501E-02	0.7220	0.0036	97.50	2.353E+00	8.115E-02
15320.301	1.392E-02	0.7242	0.0022	97.79	2.611E+00	8.447E-02
16459.264	1.296E-02	0.7275	0.0033	98.24	3.060E+00	9.104E-02
17627.289	1.210E-02	0.7288	0.0013	98.41	1.083E+00	3.046E-02
18825.967	1.133E-02	0.7305	0.0017	98.64	2.708E+00	7.069E-02
20056.617	1.064E-02	0.7316	0.0011	98.80	1.216E+00	3.004E-02
21318.398	1.001E-02	0.7333	0.0017	99.03	4.049E+00	9.379E-02
22609.898	9.435E-03	0.7357	0.0024	99.35	3.690E+00	8.017E-02
23934.992	8.913E-03	0.7374	0.0017	99.58	2.470E+00	5.060E-02
25695.631	8.302E-03	0.7386	0.0011	99.74	2.005E+00	3.857E-02
28358.555	7.522E-03	0.7399	0.0013	99.91	9.486E-01	1.619E-02
31304.355	6.814E-03	0.7401	0.0003	99.95	5.087E-01	8.242E-03