

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG**

**ENGENHARIA CIVIL**

**MIRIAN CARDOSO NAVES**

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EXPANSIVAS EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO: ensaio laboratorial em barras de argamassa atacadas por sulfatos e  
investigação em estrutura da Estação de Tratamento de Esgoto do município de  
Coqueiral - MG**

**Varginha - MG  
2019**

**MIRIAN CARDOSO NAVES**

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EXPANSIVAS EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO: ensaio laboratorial em barras de argamassa atacadas por sulfatos e  
investigação em estrutura da Estação de Tratamento de Esgoto do município de  
Coqueiral - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do professor Me. Ivan Francklin Júnior.

**Varginha – MG  
2019**

**MIRIAN CARDOSO NAVES**

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EXPANSIVAS EM ESTRUTURAS DE  
CONCRETO: ensaio laboratorial em barras de argamassa atacadas por sulfatos e  
investigação em estrutura da Estação de Tratamento de Esgoto do município de  
Coqueiral - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em 06/12/2019

---

Prof. Me. Ivan Francklin Júnior

---

Membro da banca examinadora 01

---

Membro da banca examinadora 02

OBS.:

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado força quando eu não sabia mais de onde tirá-la e por conseguir chegar neste momento tão sonhado, a finalização do meu curso.

Se hoje caminho para a conclusão desta etapa em minha vida, devo tudo aos meus pais e aos meus irmãos. Obrigada por sempre me apoiarem e por acreditarem em mim!

Agradeço às minhas amigas, Marina, Natália e Thaíssa, pelo companheirismo e por sempre me proporcionarem encontros que lavam a alma.

Ao meu orientador, que percorreu comigo esta caminhada e me guiou.

Ao SAAE de Coqueiral, pela oportunidade da realização deste estudo em minha cidade.

A todos que de algum modo participaram da realização deste trabalho e colaboraram para a minha formação.

“A possibilidade de realizarmos um sonho é o que torna a vida interessante.”

Paulo Coelho

## RESUMO

O estudo de patologias em estrutura de concreto armado é de grande importância para os profissionais do ramo da construção civil. O entendimento do comportamento das estruturas em meios adversos, submetidos à interferência de agentes locais que podem afetar a qualidade do concreto faz com que os estudos desenvolvidos sejam cada vez mais difundidos. A degradação do concreto armado pode acontecer por processos mecânicos, físicos, químicos ou biológicos. Este trabalho aborda especialmente o ataque por sulfatos em estruturas de concreto por se tratar de uma patologia muito comum e importante de ser estudada e analisada. Barras de argamassa foram confeccionadas para a verificação da expansibilidade provocada por este tipo de ataque. As barras foram produzidas com o agregado mais abundante comercializado na região, o gnaiss proveniente da mineração Pedreira Santo Antônio em Varginha – MG. Posteriormente, foi feito um estudo de caso da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Coqueiral – MG. Não foi detectado sulfatos na análise mineralógica. As barras de argamassa apresentaram expansões resultantes de 0,10%, não significativas, mas atribuídas ao cimento e não ao agregado. A concentração de sulfatos encontrada na ETE foi de 29,75 mg/L, enquadrada como agressividade fraca, não é potencialmente deletéria. Porém, a estrutura apresenta uma manifestação patológica, menos severa, a lixiviação. Foi proposto um método mitigador para a mesma, a impermeabilização. É essencial o conhecimento da composição dos agregados de uma determinada região para os profissionais que ali atuam. Quanto mais difundido o conhecimento sobre patologias em concreto armado for entre os profissionais do meio, antecipadamente irão acontecer os diagnósticos na estrutura.

**Palavras-chave:** Patologias em estruturas de concreto armado. Durabilidade das estruturas de concreto armado. Ataque por sulfatos.

## **ABSTRACT**

*The study of pathologies in reinforced concrete structure is of great importance for professionals in the civil construction industry. The understanding of the behavior of structures in adverse environments, subjected to the interference of local agents that may affect the quality of concrete, makes the studies developed increasingly widespread. The degradation of reinforced concrete can occur by mechanical, physical, chemical or biological processes. This work especially addresses the sulfate attack in concrete structures because it is a very common and important pathology to be studied and analyzed. Mortar bars were made to verify the expansibility caused by this type of attack. The bars were produced with the most abundant aggregate sold in the region, the gneiss from the Santo Antônio quarry in Varginha - MG. Subsequently, a case study of the Sewage Treatment Plant in the city of Coqueiral - MG was carried out. No sulfates were detected in the mineralogical analysis. The mortar bars showed expansions of 0.10%, not significant, but attributed to cement and not to aggregate. The concentration of sulfates found in TEE was 29.75 mg/L, classified as weak aggressiveness, is not potentially harmful. However, the structure presents a pathological manifestation, less severe, leaching. A mitigating method was proposed for this, waterproofing. It is essential to know the composition of the aggregates of a given region for the professionals who work there. The more widespread the knowledge about reinforced concrete pathologies among the professionals in the environment, the earlier the diagnoses in the structure will occur.*

**Keywords:** *Pathologies in reinforced concrete structures. Durability of reinforced concrete structures. Sulfate attack.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto .....	17
Figura 2 – Origem dos problemas patológicos.....	18
Figura 3 – Desgaste do concreto por abrasão .....	25
Figura 4 – Fissuração por retração do concreto.....	26
Figura 5 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado .....	27
Figura 6 – Ataque de sulfato na base de um pilar de concreto armado .....	30
Figura 7 – Eflorescência no concreto armado .....	31
Figura 8 – Localização geográfica do Grupo Pedreira Santo Antônio .....	34
Figura 9 – Procedimentos para obtenção da massa específica do agregado .....	35
Figura 10 – Frasco de Chapman utilizado no ensaio de massa específica do cimento.....	36
Figura 11 – Frações granulométricas produzidas do gnaïsse .....	38
Figura 12 – Adição do cimento no misturador mecânico .....	39
Figura 13 – Corpos de prova moldados .....	40
Figura 14 – Corpos de prova em cura inicial .....	41
Figura 15 – Corpos de prova após a desmoldagem .....	41
Figura 16 – Corpos de prova em cura intermediária.....	42
Figura 17 – Leitura inicial do corpo de prova no extensômetro.....	42
Figura 18 – Armazenamento dos corpos de prova .....	43
Figura 19 – Corpos de prova em cura final .....	44
Figura 20 – ETE no município de Coqueiral – MG .....	46
Figura 21 – ETE no município de Coqueiral – MG .....	46
Figura 22 – Caixa de recebimento da ETE de Coqueiral - MG .....	47
Figura 23 – Soluções reagentes .....	49
Figura 24 – Soluções preparadas .....	49
Figura 25 – Agitador magnético .....	50
Figura 26 – Espectrofotômetro .....	50
Figura 27 – Curva granulométrica do agregado miúdo .....	51
Figura 28 – Expansão resultante das barras de argamassa.....	56
Figura 29 - Filtro de concreto com eflorescência .....	58
Figura 30 - Filtro de concreto com eflorescência .....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos requisitos de qualidade para estruturas de concreto.....	32
Tabela 2 – Frações do agregado miúdo.....	37
Tabela 3 – Mistura mecânica.....	38
Tabela 4 – Massa específica do agregado e do cimento .....	52
Tabela 5 – Minerais identificados no gnaisse.....	52
Tabela 6 – Porcentagem média dos minerais identificados no gnaisse .....	53
Tabela 7 – Traço da argamassa.....	53
Tabela 8 – Expansão das barras em sulfato de sódio.....	54
Tabela 9 – Expansão das barras em água saturada com cal .....	55
Tabela 10 – Curva de calibração .....	57

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

MG – Estado de Minas Gerais

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

SAAE – Sistema Autônomo de Água e Esgoto

g – grama

mm - milímetro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{Ca(OH)}_2$  – Hidróxido de cálcio

$\text{C}_3\text{A}$  – Aluminato tricálcico

$\text{Na}_2\text{O}_4$  – Superóxido de sódio

$\text{H}_2\text{O}$  – Água

$\text{CaSO}_4$  – Sulfato de cálcio

$\text{NaOH}$  – Hidróxido de sódio

$\text{CaO}$  – Cal viva

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Alumina

$\text{CaSiO}_3$  – Silicato de cálcio

$\text{CaCO}_3$  – Carbonato de cálcio

$\text{SO}_4^{2-}$  – Sulfato

$\text{Ca}_2\text{CO}_3$  – Gipsita

$^\circ\text{C}$  – Graus Celsius

$\rho$  – massa específica

$\text{SiO}_2$  – Quarto

$\text{Al}_2\text{Fe}_3(\text{SiO}_4)_3$  – Almandina

$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$  – Albita

$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  – Microclínio

$\text{K}_{0,78}\text{Na}_{0,22}\text{Mg}_{1,63}\text{Fe}_{0,85}\text{Ti}_{0,33}\text{Al}_{1,35}\text{Si}_{2,84}\text{O}_{11}(\text{OH})$  – Biotita

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Óxido férrico

$\text{MgO}$  – Óxido de magnésio

$\text{TiO}_2$  – Dióxido de titânio

$\text{P}_2\text{O}_5$  – Pentóxido de fósforo

$\text{Na}_2\text{O}$  – Óxido de sódio

$\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de potássio

$\text{MnO}$  – Óxido de manganês

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3 Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Patologias das Estruturas de Concreto</b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Patologias geradas na etapa de concepção da estrutura (projeto) .....	18
2.1.2 Patologias geradas na etapa de execução da estrutura (construção) .....	19
2.1.3 Patologias geradas na etapa de utilização da estrutura (manutenção).....	20
<b>2.2 Durabilidade</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Deterioração do concreto .....	22
2.2.1.1 Mecanismos de transporte .....	23
2.2.1.2 Causas da deterioração das estruturas .....	24
2.2.1.2.1 Processos biológicos.....	24
2.2.1.2.2 Processos físicos.....	25
2.2.1.2.3 Processos químicos.....	26
<b>2.3 Ataque por sulfatos</b> .....	<b>28</b>
<b>2.4 Lixiviação e eflorescência</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5 Sulfato no esgoto</b> .....	<b>32</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1 Escolha dos materiais para realização da análise de reação por sulfatos</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2 Caracterização física dos materiais componentes das argamassas</b> .....	<b>35</b>
<b>3.3 Características mineralógicas dos gnaisses da Pedreira Santo Antônio</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4 Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfatos de sódio</b> .....	<b>36</b>
3.4.1 Equipamentos utilizados.....	36
3.4.2 Classificação dos materiais utilizados .....	37
3.4.3 Produção das barras de argamassa em laboratório.....	37
3.4.3.1 Cura inicial ao ar (2 dias).....	40
3.4.3.2 Cura intermediária em água (12 dias) .....	41
3.4.3.3 Cura final em água saturada com cal e em solução agressiva de sulfato de sódio (42 dias).....	43
3.4.4 Medição dos comprimentos das barras – Idades de medição .....	44
<b>3.5 Estudo de caso: quantificação da concentração de sulfatos em amostra de esgoto</b> ...	<b>45</b>
3.2.1. Escolha do método .....	46
3.2.2. Coleta da amostra.....	47
3.2.3. Execução do ensaio de determinação do teor de sulfatos em laboratório .....	47
3.2.4. Preparação das soluções reagentes.....	48
3.2.5. Preparação da curva de calibração de $\text{SO}_4^{2-}$ .....	49
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
<b>4.1 Determinação dos índices físicos do agregado gnáissico e do cimento</b> .....	<b>51</b>
<b>4.2 Caracterização mineralógica do agregado gnáissico</b> .....	<b>52</b>
<b>4.3 Determinação da expansibilidade e verificação de eventuais ataques por sulfatos no concreto</b> .....	<b>53</b>

<b>4.4 Análise da quantidade de sulfatos existente na Estação de Tratamento de Esgoto ...</b>	<b>57</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO A – RESULTADO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X DO GNAISSE.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO B – RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA DO GNAISSE.....</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Qualquer edificação deve atender não somente às necessidades dos usuários, mas também a uma série de critérios normativos relacionados à capacidade resistente da estrutura, ao desempenho em serviço e à durabilidade, que visam à integridade da estrutura em longo prazo (ABNT NBR 6118:2014).

O conhecimento sobre o concreto, sua composição e seu comportamento característico em determinadas condições é de grande importância para a determinação de parâmetros construtivos adequados, visando maior durabilidade, vida útil para uma estrutura. A utilização de métodos construtivos e o emprego de materiais de construção inadequados também interferem diretamente nas mesmas (SOUZA; RIPPER, 2009).

Os materiais empregados na construção precisam ser de qualidade, a mão de obra também necessita ser de qualidade e ser supervisionada constantemente pelo engenheiro responsável. Ainda assim, a manutenção da edificação durante o seu período de utilização irá influenciar diretamente na durabilidade e no tempo de vida útil desta (ABNT NBR 6118:2014).

Conforme explicam Ripper e Souza (2009), os sulfatos são elementos extremamente agressivos. Eles podem ser encontrados nos materiais que compõem o concreto e também em solos e águas. Os principais sulfatos são os sulfatos de cálcio, de sódio e de magnésio.

O ataque por sulfatos é uma manifestação patológica que varia conforme o agregado e o tipo de cimento utilizado, dentre outros fatores. No cimento, existe a gipsita (gesso) que é adicionada para a produção do cimento comum. A mesma, combinando com os outros elementos químicos do próprio cimento, formam a etringita, que é expansiva e gera tensões capazes de fissurar o concreto. Ressalta-se que o ataque por sulfato não interfere somente na integridade do cimento ou na do agregado ou de outro componente, mas na combinação de todos eles (NEVILLE, 2015).

É importante que esta patologia específica seja muito bem analisada. Ao construir um empreendimento, por exemplo, durante uma sondagem já pode ser feita a coleta do solo para analisar o teor de sulfatos neste. Os elementos de fundação, tubulões, estacas estarão em contato direto com o solo, mas não é somente a resistência dele que é importante, mas a sua composição também porque a mesma gera manifestações patológicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Baseado no estudo apresentado espera-se que o modo como as patologias em concreto armado é visto pelos profissionais e pelos usuários seja alterado e tratado com a importância que tem dentro do ramo da construção civil. As patologias resultantes do ataque por sulfatos, quando detectadas no início, podem ter soluções simplificadas aplicadas, aumentando consideravelmente a durabilidade e vida útil da estrutura.

## **1.1 Justificativa**

No que tange as discussões sobre a durabilidade das edificações, as patologias em concreto armado são questões de crescente preocupação nos meios acadêmicos e também técnicos. Isso implica a grande importância de estudos de caso nesse ramo. Os estudos das patologias e suas terapias podem ser utilizados como guias para prevenção das deteriorações do concreto que venham a incidir, inibindo-as ainda na fase de projeto e execução.

Este trabalho qualifica as características da argamassa produzida com agregado gnáissico, a fim de fornecer melhor entendimento do comportamento de estruturas produzidas com esse tipo de agregado.

Com os estudos das patologias em concreto armado, nota-se que muitos problemas poderiam ser evitados caso alguns pré-requisitos básicos de qualidade fossem seguidos. É importante ressaltar que profissionais qualificados devem ser contratados para a recuperação de uma estrutura. Pois, a determinação da metodologia correta, adequada mão de obra e materiais de construção de qualidade irão determinar o sucesso ou não da recuperação da estrutura.

Uma vez detectadas expansões significativas, condições que eventualmente podem prejudicar a durabilidade, vida útil das estruturas produzidas aqui na região, deve-se propor métodos mitigadores da recuperação baseados em estudos específicos e feitos *in loco*.

## **1.2 Objetivo Geral**

Verificar o potencial expansivo em barras de argamassas produzidas com agregados gnáissicos provenientes do município de Varginha – MG, mediante exposição à solução de sulfato de sódio e realizar o estudo de manifestações patológicas por meio de inspeção das estruturas da Estação de Tratamento de Esgoto do município de Coqueiral – MG.

### 1.3 Objetivos Específicos

- Definir os materiais que irão compor a argamassa;
- Caracterizar fisicamente o cimento e o agregado;
- Caracterizar mineralogicamente o agregado gnáissico;
- Realizar o ensaio de expansibilidade em argamassas atacadas por sulfatos seguindo os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 13583:2014;
- Realizar uma inspeção nos elementos estruturais da ETE do município de Coqueiral – MG;
- Diante das análises de inspeção, propor métodos para a recuperação das estruturas, caso a mesma esteja deteriorada e/ou métodos mitigadores das manifestações patológicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

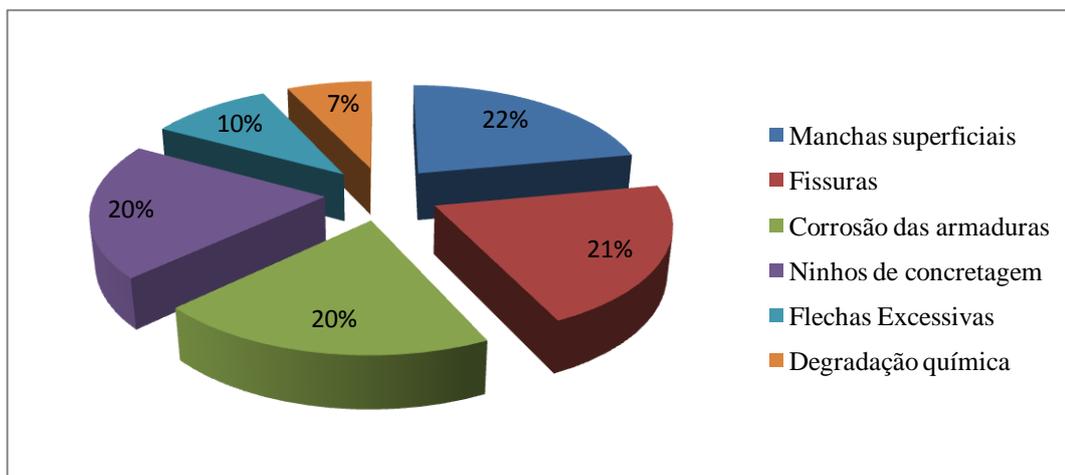
### 2.1 Patologias das Estruturas de Concreto

De acordo com Souza e Ripper (2009), denomina-se Patologia das Estruturas o campo da Engenharia das Construções que abrange o estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Ela não é somente um novo campo no aspecto da identificação e conhecimento das anomalias, é também fundamental no que se refere à concepção e ao projeto das estruturas.

Mehta e Monteiro (2014) apontam que é necessário ter consciência da durabilidade do material e explicam que são diversas as causas da deterioração do concreto. A água apresenta efeito destrutivo quando penetra nos sólidos porosos. Os efeitos físicos resultam em desgaste da superfície e fissuração. Já os efeitos químicos ocasionam lixiviação e reações expansivas, as quais envolvem o ataque por sulfato, a reação álcali-agregado e a corrosão das armaduras no concreto.

Helene (1992) ressalta que os problemas patológicos geralmente apresentam manifestações externas características. Assim, é possível deduzir qual a origem e o mecanismo da manifestação presente no concreto, e ainda estabelecer possíveis consequências. A Figura 1 mostra a distribuição relativa das manifestações patológicas mais comuns em estruturas de concreto.

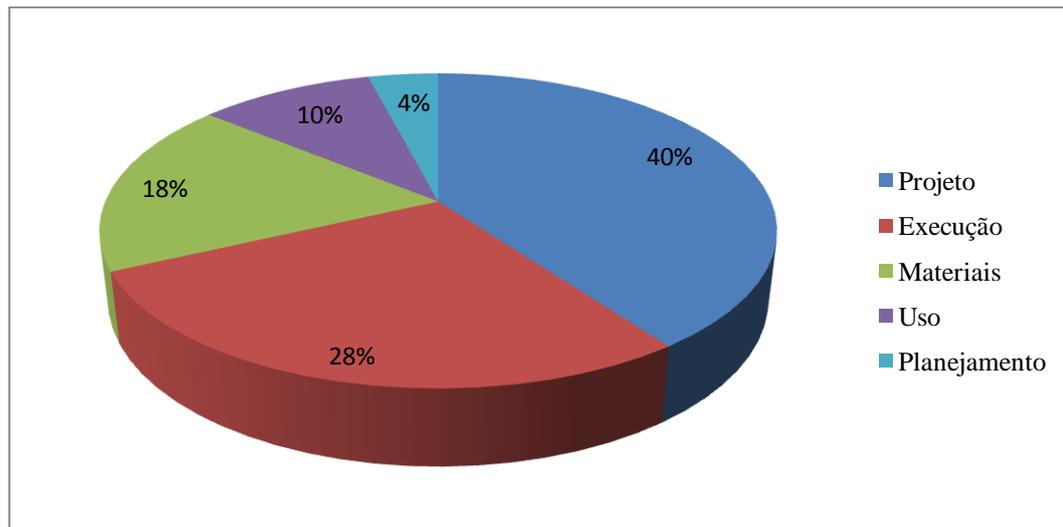
Figura 1 – Distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto



Fonte: Helene (1992).

O processo de construção civil pode ser dividido em cinco etapas: planejamento, projeto, fabricação de materiais e componentes fora do canteiro, execução e uso. A distribuição relativa da origem dos problemas patológicos com relação a essas etapas é apresentada na Figura 2 (HELENE, 1992).

Figura 2 – Origem dos problemas patológicos



Fonte: Grunau (1981) apud Helene (1992).

Nota-se que os erros de projeto, execução e a utilização de materiais inapropriados representam uma parcela significativa das origens patológicas. É importante ressaltar que muitas falhas na execução poderiam ser evitadas se houvesse mais especificações no projeto, mesmo as que não são previstas em normas técnicas.

Já Souza e Ripper (2009) definem que as patologias são geradas em três etapas básicas da estrutura: concepção, execução e utilização. Em se tratando de qualidade, a etapa de concepção requer a garantia de plena satisfação do cliente, de facilidade de execução e viabilidade de manutenção; a etapa de execução exige o fiel atendimento ao projeto; e a etapa de utilização necessita garantir a satisfação do utilizador e a possível extensão da vida útil da obra.

### 2.1.1 Patologias geradas na etapa de concepção da estrutura (projeto)

As falhas que ocorrem durante a etapa de concepção da estrutura podem se originarem durante o estudo preliminar, a execução do anteprojeto ou na elaboração do projeto de

execução. Se a falha ocorrer no estudo preliminar, as dificuldades técnicas e o custo para solucionar o problema patológico gerado por ela serão maiores do que a de uma falha que ocorra na fase da execução do anteprojeto. No entanto, falhas geradas em ambas as fases são responsáveis pelo aumento do valor do processo de execução (SOUZA; RIPPER, 2009).

As falhas geradas na realização do projeto final, segundo Souza e Ripper (2009), são responsáveis pelo surgimento de graves problemas patológicos. As mesmas podem ser por:

- Elementos de projeto inadequados (má definição das ações atuantes ou da combinação mais desfavorável das mesmas, deficiência no cálculo da estrutura ou na avaliação da resistência do solo, escolha infeliz do modelo analítico, dentre outros);
- Falta de compatibilização entre a estrutura e a arquitetura, e também com os demais projetos civis;
- Erros de dimensionamento;
- Detalhes construtivos inexequíveis;
- Especificação inadequada de materiais;
- Falta de padronização das representações;
- Detalhamento insuficiente ou errado.

### 2.1.2 Patologias geradas na etapa de execução da estrutura (construção)

A etapa de execução só pode ser iniciada após o término da etapa de concepção. Então, começada a construção, as causas das falhas nessa fase podem ser: a má qualidade de materiais e componentes, a inexistência de controle de qualidade de execução, a irresponsabilidade técnica, a falta de condições locais de trabalho e até sabotagem (SOUZA; RIPPER, 2009).

Helene (1992) afirma que toda medida extraprojeto tomada durante a execução para obter certo grau de proteção e durabilidade da estrutura implica em um custo cinco vezes maior ao custo gerado se esta medida fosse tomada durante a etapa de projeto. Uma mesma medida tomada durante o projeto permite o redimensionamento automático da estrutura considerando-se um concreto de resistência maior à compressão, módulo de deformação mais baixo, de menor deformação lenta e maiores resistências à baixa idade. Características estas que promovem diminuição das dimensões dos componentes estruturais e economia de formas, redução de taxa de armadura, de volumes e peso próprio, dentre outros.

Os erros grosseiros em obra de edificação habitacional, facilmente constatáveis, são: desnivelamento de pisos, execução de argamassas de assentamento de pisos cerâmicos espessas, falta de caimento correto em pisos molhados, flechas excessivas em lajes e falta de prumo, de esquadro e de alinhamento de elementos estruturais. Já erros como no caso de deficiências nas instalações hidráulicas e elétricas são difíceis de serem verificados e são observados adequadamente após certo tempo de uso (SOUZA; RIPPER, 2009).

Souza e Ripper (2009) apontam que os problemas patológicos que possuem origem na execução são basicamente ocasionados no processo de produção, pois sofrem influência da baixa qualidade técnica dos trabalhadores menos qualificados e também dos que possuem alguma qualificação profissional.

Os sistemas construtivos são dependentes do grau de evolução técnica alcançado pela indústria de materiais e componentes. Existente a dificuldade de interação dos dois setores. O sistema de controle pelo construtor tem-se mostrado bastante falho e a metodologia para a fiscalização e a aceitação dos materiais geralmente não é aplicada. Isso enfatiza como a indústria da construção civil ocupa a posição subalterna em relação à indústria de materiais e componentes (SOUZA; RIPPER, 2009).

Como consequência da baixa qualidade dos materiais e componentes, alguns problemas como menor durabilidade, presença de agentes agressivos incorporados e a baixa resistência mecânica podem ser implantados nas estruturas (SOUZA; RIPPER, 2009).

### 2.1.3 Patologias geradas na etapa de utilização da estrutura (manutenção)

Durante a fase de uso da edificação, as manifestações patológicas podem surgir decorrentes da má utilização ou até mesmo oriundas da falta de manutenção da edificação por parte do proprietário ou usuário (DAL MOLIN, 1988).

Para que a estrutura tenha bom desempenho, deve ser feita uma manutenção eficiente e periódica, essencialmente onde o desgaste e a deterioração são mais abrangentes. É importante informar ao usuário sobre as suas possibilidades, como fazer a manutenção das paredes portantes de edifícios em alvenaria estrutural; e sobre as limitações da obra como, por exemplo, a capacidade de carga de uma ponte deve ser sempre informada, em local visível e de forma insistente (SOUZA; RIPPER, 2009).

Helene (1992) destaca que ao realizar a manutenção preventiva, a medida tomada com antecedência e prevista pode acarretar em um custo cinco vezes menor do que quando

precisar corrigir problemas gerados por não ter tomado essa medida antes da manifestação de patologias. O mesmo ressalta que a manutenção corretiva corresponde aos trabalhos de diagnóstico, reparo e proteção das estruturas que já possuem problemas patológicos que precisam ser corrigidos e que estas ações podem implicar em um custo vinte e cinco vezes maiores que o custo de medidas que poderiam ter sido tomadas na etapa de projeto.

## **2.2 Durabilidade**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na ABNT NBR 6118:2014 define que as estruturas de concreto devem atender requisitos mínimos de qualidade a serem atingidos durante a sua construção e utilização. Estes requisitos são classificados em três grupos:

- Capacidade resistente: são os requisitos relacionados à capacidade resistente da estrutura ou de seus elementos componentes, os quais consistem basicamente na segurança à ruptura;
- Desempenho em serviço: são os requisitos relacionados ao desempenho da estrutura quando em uso, à capacidade de se manter íntegra durante a sua utilização;
- Durabilidade: são os requisitos relacionados à durabilidade, à capacidade da estrutura a resistir às influências do meio em que está situada, conforme previstas e definidas pelo projetista.

Em relação à durabilidade, esta norma exige que as estruturas feitas de concreto sejam projetadas e construídas de modo que, apesar das influências do meio em que se encontram, as mesmas conservem a segurança, a estabilidade e tenham comportamento adequado durante o período considerado de sua vida útil. A vida útil de projeto é a duração na qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções que sejam significativas, desde que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, como também de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais (ABNT NBR 6118:2014).

Souza e Ripper (2009) enfatizam esta associação entre vida útil e durabilidade. Ambos definem como durabilidade o parâmetro que relaciona a aplicação das características de deterioração do concreto a cada construção, por sua reação aos efeitos da agressividade ambiental, a qual define a vida útil da mesma.

Segundo Helene (1992) numerosas construções apresentam manifestações patológicas de grande significância, que comprometem, além da estética, a capacidade de resistência, sendo capaz de levar a estrutura ao colapso.

Para Fusco (2012), a eficaz durabilidade do concreto de toda estrutura depende que sua fabricação seja feita com materiais não expansivos e também da sua capacidade de resistência às agressões provindas do meio externo.

Qualquer solução estrutural encontrada para as edificações deve atender aos requisitos de qualidade estabelecidos nas normas técnicas. A qualidade das soluções adotadas deve considerar as condições arquitetônicas, estruturais, construtivas de acordo com a ABNT NBR 14931:2004, funcionais e de integração com os demais projetos (elétrico, hidráulico, dentre outros), conforme os responsáveis técnicos de cada especialidade após acesso do contratante (ABNT NBR 6118:2014).

Mehta e Monteiro (2014) reforçam que a durabilidade dos materiais de construção deve ser avaliada pelos projetistas de estruturas com a mesma atenção que demais aspectos, como as propriedades mecânicas e custo inicial. É estimado que, em países industrialmente desenvolvidos, apenas 60% do total de recursos das indústrias da construção são aplicados em novas instalações e cerca de 40% em reparo e manutenção de estruturas existentes. Este elevado percentual submetem os profissionais a darem mais atenção às questões de durabilidade.

### 2.2.1 Deterioração do concreto

Ao iniciar o estudo da patologia em uma estrutura de concreto é extremamente necessário entender como ela surgiu e se desenvolveu, antes de prescrever e aplicar um método mitigador. Para isto, conhecer as origens da deterioração é indispensável para proceder aos reparos da estrutura e também para garantir que a mesma não volte a deteriorar (SOUZA; RIPPER, 2009).

Souza e Ripper (2009) salientam as classificações das causas dos processos de deterioração das estruturas de concreto em duas: causas intrínsecas e causas extrínsecas. As causas intrínsecas são inerentes às próprias estruturas e as extrínsecas são externas ao corpo estrutural.

As causas intrínsecas relacionadas por Souza e Ripper (2009) são:

- Falhas humanas durante a construção da estrutura: deficiências de concretagem e nas armaduras, inadequação de fôrmas e escoramentos, utilização incorreta de materiais de construção e inexistência de controle de qualidade;
- Falhas humanas na fase de utilização: ausência de manutenção;
- Causas naturais: causas próprias à estrutura do concreto, causas químicas, físicas e biológicas.

As causas extrínsecas citadas ainda por Souza e Ripper (2009) são:

- Falhas humanas durante a concepção (projeto) da estrutura: modelização estrutural inadequada, má avaliação das cargas, inadequação ao ambiente, incorreção na interação solo-estrutura, incorreção na consideração de juntas de dilatação, detalhamento errado ou insuficiente;
- Falhas humanas durante a etapa de utilização (vida útil) da estrutura: sobrecargas exageradas, alterações estruturais e das condições do terreno de fundação;
- Ações mecânicas: acidentes (ações imprevisíveis), recalque de fundações e choques de veículos;
- Ações físicas: ação da água, variações de temperatura e insolação;
- Ações químicas: ar e gases, águas agressivas, águas quimicamente puras, reações com ácidos e sais, e reações com sulfatos;
- Ações biológicas.

#### 2.2.1.1 Mecanismos de transporte

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a água habitua ser o agente central para a maioria dos problemas da durabilidade no concreto. Ela é a origem de muitos tipos de processos físicos da degradação nos sólidos porosos e pode também ser a fonte de processos químicos de degradação como veículo para transporte de íons agressivos. Os fenômenos físico-químicos correlacionados ao transporte de água em sólidos porosos são controlados pela permeabilidade do mesmo. Além da taxa de deterioração ser afetada pelo tipo e concentração de íons presente na água, também é afetada pela composição química do sólido.

De acordo com Souza e Ripper (2009), em função do meio de transporte, a interação entre os agentes agressivos e a estrutura porosa do concreto é variável. Os mecanismos de transporte são:

- Difusão: mecanismos de transporte pelo ar de gases, de água e de agentes agressivos diluídos, como carbonetos, cloretos e sulfatos;
- Capilaridade ou absorção: transporte pela água da chuva ou das marés;
- Penetração direta ou permeabilidade: transporte em condições de imersão e sob pressão.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a deterioração do concreto dificilmente se deve a somente uma causa. Geralmente, as causas químicas e físicas se reforçam e estão interligadas, tornando difícil a separação entre elas. Os processos de deterioração são classificados para explicar os fenômenos de forma individual e sistemática, mas quando esses ocorrem de forma simultânea não se deve descuidar das interações que acontecem.

#### 2.2.1.2 Causas da deterioração das estruturas

Os principais processos de deterioração do concreto, segundo sua natureza, são os biológicos, físicos e químicos. Nos processos biológicos, os agentes de deterioração se referem às algas, aos microrganismos, solos e águas contaminadas. Nos processos físicos, os agentes são referentes à umidade, variação de temperatura, ciclos de umedecimento e secagem, ciclos de gelo e degelo. E nos processos químicos, os agentes se referem à corrosão, carbonatação, chuva ácida, ataque de ácidos, maresia (água do mar), águas brandas e resíduos industriais (MEDEIROS, 2010).

##### 2.2.1.2.1 Processos biológicos

Os processos biológicos podem ser resultados do ataque químico de ácidos (produção de anidrido carbônico) gerados pelo crescimento de algas ou de raízes de plantas que instalam nos grandes poros do concreto ou em fissuras, ou por ação de fungos (SOUZA; RIPPER, 2009).

O processo biológico mais importante e comum ocorre pela ação de sulfetos. Os sulfetos, inicialmente em forma de gás sulfídrico ( $H_2S$ ) dissolvido na água, quando entram em

contato com o cálcio do cimento Portland, e diante de bactérias aeróbicas, formam o sulfureto de cálcio, o qual descalcifica o concreto, amolecendo a pasta de cimento. Como exemplos desses ataques, podem ser citadas as galerias da rede de esgotos (SOUZA; RIPPER, 2009).

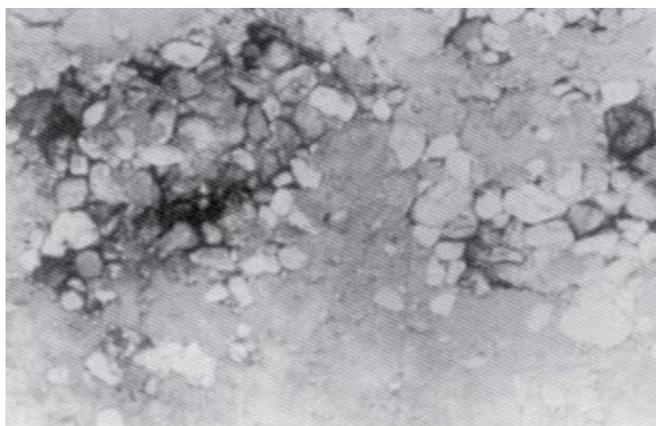
Paulon (1986 apud BRANDÃO, 1998), afirma que o ataque do concreto biologicamente não é uma situação comum. Exceto em galerias de esgoto, conforme descrito anteriormente, este tipo de ataque não costuma provocar danos significativos. Ainda de acordo com o autor, para impedir o crescimento de parasitas nas superfícies expostas da estrutura, é sugerido a introdução de sais de cobre à massa de concreto.

#### 2.2.1.2.2 Processos físicos

Mehta e Gerwick (1982 apud MEHTA E MONTEIRO, 2014) classificam as causas físicas em duas categorias: desgaste superficial e fissuração. O desgaste superficial ocorre devido à abrasão, erosão e cavitação. E a fissuração é devida a carregamentos estruturais, gradientes normais de temperatura e umidade, cristalização de sais nos poros e à exposição a temperaturas extremas.

Souza e Ripper (2009) explicam que o ar e a água carregam partículas que provocam abrasão, ilustrada na Figura 3. A ação dessas partículas ocasiona a erosão e a sua intensidade depende da dureza, do tamanho, da forma e da quantidade das partículas em suspensão, da velocidade do ar ou da água, e também da qualidade do concreto presente na estrutura. Já a cavitação acontece com a formação de pequenas cavidades, pela movimentação da água em alta velocidade.

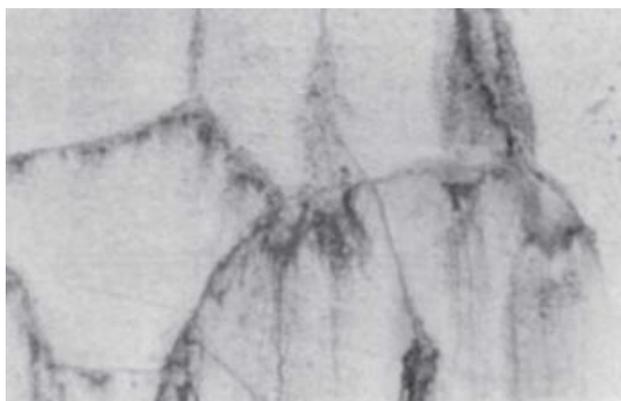
Figura 3 – Desgaste do concreto por abrasão



Fonte: Souza e Ripper (2009).

São diversas as causas que podem gerar quadros fissuratórios, como as deficiências de projeto, contração plástica do concreto, assentamento do concreto / perda de aderência das barras da armadura, movimentação de fôrmas e escoramentos, retração do concreto, deficiências de execução, reações expansivas, corrosão das armaduras, recalques diferenciais, variação da temperatura e ações aplicadas. A fissuração por retração do concreto é mostrada na Figura 4 (SOUZA; RIPPER, 2009).

Figura 4 – Fissuração por retração do concreto



Fonte: Souza e Ripper (2009).

#### 2.2.1.2.3 Processos químicos

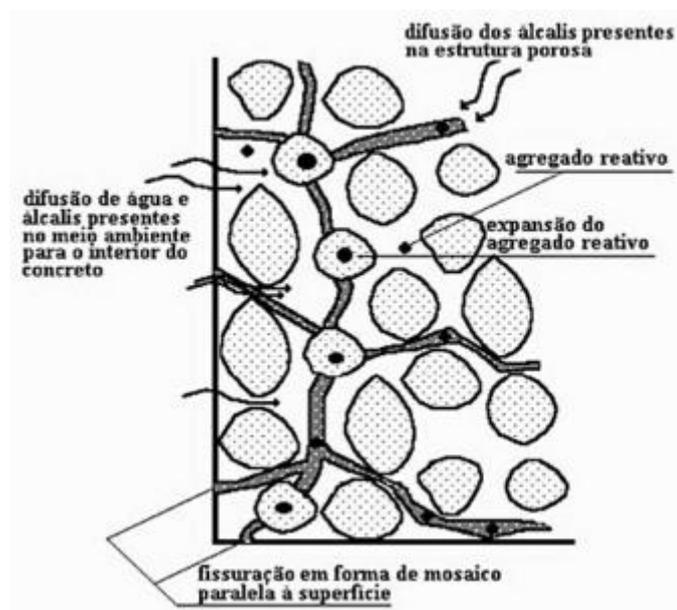
As reações químicas ocorrem entre o cimento e os agregados (miúdos ou graúdos) para que exista uma boa aderência entre os mesmos. São reações benéficas, que contribuem para o aumento da resistência mecânica e homogeneidade do concreto. Em contrapartida, outras reações podem se desenvolver, as reações químicas expansivas, danificando a estrutura no sentido de anular a coesão do concreto (SOUZA; RIPPER, 2009).

Mehta e Gerwick (1982 apud MEHTA E MONTEIRO, 2014) classificam os processos químicos em três categorias: hidrólise de componentes da pasta de cimento; reações de trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento; e reações envolvendo a formação de produtos expansivos, como no ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão das armaduras.

Souza e Ripper (2009) explicam que a reação álcali-agregado é resultado da interação entre a sílica reativa de alguns tipos de minerais utilizados como agregados e os íons álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) presentes nos cimentos, quando a porcentagem é superior a 0,6%. São libertados durante a hidratação dos cimentos ou ainda pela penetração de cloretos. É uma reação expansiva, que de início provoca a fissuração da superfície do concreto e posteriormente

desagrega a estrutura, criando crateras profundas e de aspecto cônico. Às vezes, pelas crateras escorre um gel de sílica. A Figura 5 representa o desenvolvimento simplificado da reação álcali-agregado no concreto.

Figura 5 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto



Fonte: Souza e Ripper (2009).

A corrosão do aço no concreto pode ocorrer de duas formas. As células de composição podem se formar quando dois metais diversos são introduzidos no concreto ou quando existem significantes variações nas características da superfície do aço. E, também, as células podem ser formadas ao redor da armadura por causa das diferentes concentrações de íons dissolvidos, como álcalis e cloretos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo ainda Souza e Ripper (2009), a presença em altos teores de íons de cloreto no concreto pode resultar em vários problemas estruturais, tais como:

- Os cloretos podem fazer com que ocorra o endurecimento precoce do concreto em dias de temperatura ambiente elevada, podendo o tempo ser insuficiente para o preenchimento total das formas e impedir o acabamento das superfícies;
- O processo de corrosão das armaduras pode ser acelerado pela presença de cloreto de cálcio quando a estrutura não recebe o cobrimento necessário estabelecido por norma;
- Elementos estruturais com cloretos próximos a correntes elétricas resultam em corrosão eletrolítica;

- Com o endurecimento acelerado, o concreto sofre retração, aumentando o surgimento de fissuras.

Não é incomum encontrar concentrações de sulfato possivelmente deletérias em águas naturais e industriais. Grande parte dos solos contém sulfato na forma de gipsita  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (comumente de 0,01 a 0,05% expresso como  $\text{SO}_4$ ) em quantidade considerada inofensiva ao concreto. Em temperatura normal, a solubilidade da gipsita em água é muito limitada. As concentrações maiores de sulfato nas águas subterrâneas se devem geralmente à presença de sulfatos de magnésio, sódio e potássio. Em solos e águas agrícolas estão presentes os sulfatos de amônia, em efluentes de fornos e indústria química podem conter ácido sulfúrico. O ácido sulfúrico é transformado pela ação bacteriana, a partir do sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), o qual costuma ser formado pela decomposição de matéria orgânica em lagos rasos, pântanos, tubulação de esgoto e poços de mineração. No resfriamento do concreto, a água utilizada nas torres podem também conter alta concentração de sulfato causada pela evaporação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

### **2.3 Ataque por sulfatos**

Segundo Neville (2015), os sais sólidos não atacam o concreto. Somente quando dissolvidos, os sais reagem com a pasta de cimento hidratada. Os sulfatos de sódio, de magnésio, de potássio e de cálcio são comuns nos solos ou no lençol freático. A solubilidade do sulfato de cálcio é baixa. Assim, as águas subterrâneas com teor de sulfato elevado contêm também outros tipos de sulfatos. É importante ressaltar que, além de os demais sulfatos reagirem com o hidróxido de cálcio, também reagem com diversos produtos da hidratação do cimento.

Os sulfatos são elementos intensamente agressivos. Após certo tempo, a ação de águas sulfatadas pode ser responsável pela total desagregação do concreto. As reações resultam em produtos expansivos, geram tensões capazes de fissurar o concreto, causando a sua deterioração (SOUZA; RIPPER, 2009).

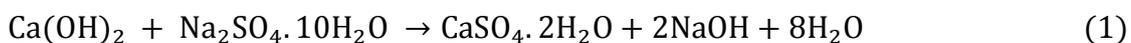
Fusco (2012) enfatiza que a zona de borrifos, nas obras marítimas, é a que mais sofre com o ataque combinado dos sulfatos ao concreto e dos cloretos à armadura. O ataque de sulfatos é bastante reduzido e o de cloretos é eliminado nas partes que são permanentemente

mergulhadas, que estejam ao menos um metro e meio de pressão positiva de água, devido à ausência de oxigênio do ar.

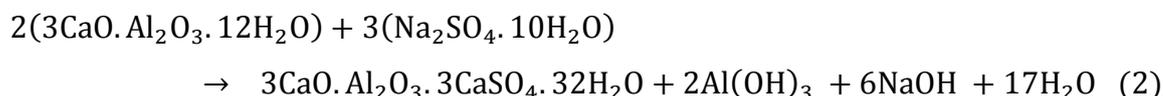
Mehta e Monteiro (2014) explicam que o ataque por sulfato pode se manifestar na forma de expansão e fissuração do concreto. O processo de deterioração do concreto é acelerado quando o mesmo fissura, pois a sua permeabilidade aumenta e a água agressiva penetra mais facilmente em seu interior. O ataque pode se manifestar também na diminuição progressiva de resistência e perda de massa, que ocorrem pela perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento.

Os sulfatos também podem ser provenientes de fertilizantes e de efluentes industriais, que podem conter sulfato de amônio. Este sulfato ataca a pasta de cimento hidratada e produz sulfato de cálcio hidratado. Sob certas condições, os sulfetos podem se oxidar em sulfatos. (NEVILLE, 2015).

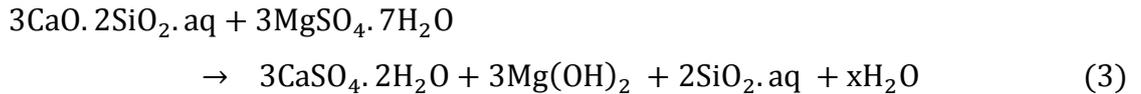
O ataque por sulfatos podem ocorrer por reações que dão origem à etringita e à gipsita. A gipsita é formada pela reação de hidróxido de cálcio com íons sulfato, hidratados. O sulfato de sódio ataca o hidróxido de cálcio, formando a gipsita, conforme a equação 1 (NEVILLE, 2015).



A etringita forma-se pela reação de hidróxido de cálcio na pasta de cimento Portland hidratada com íons sulfato, com ambos contendo alumina. A deterioração da pasta de cimento endurecida por esta formação ocorre pela perda de rigidez e resistência, pela expansão e consequente fissuração. O sulfato de sódio ataca o aluminato de cálcio hidratado, formando a etringita, conforme mostra a equação 2 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



O sulfato de magnésio ataca os silicatos de cálcio hidratados, assim como o hidróxido de cálcio e o aluminato de cálcio hidratado. A equação 3 mostra essa reação (NEVILLE, 2015).



A formação de etringita tardia (DRF – delayed ettringite formation) ocorre quando a fonte de íons sulfato é interna, através de agregados contaminados com gipsita ou cimento contendo alto teor de sulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O hidróxido de cálcio e também o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), presentes na pasta de cimento Portland hidratada, podem se converter em gipsita pelo ataque por sulfato. Isso depende do tipo de cátion (íon positivo) que está associado com a solução de sulfato ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ou  $\text{Mg}^{2+}$ ) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No ataque por sulfato de sódio, a formação do subproduto da reação, o hidróxido de sódio, assegura a manutenção da alta alcalinidade no sistema, essencial para a estabilidade do C-S-H. Já no caso do ataque por sulfato de magnésio ocorre a redução da alcalinidade, pela conversão do hidróxido de cálcio em gipsita ser acompanhada pela formação simultânea de hidróxido de magnésio (que é insolúvel). O C-S-H deixa de ser estável, na ausência de íons hidroxila na solução, e é atacado pela solução de sulfato também. Portanto, o ataque de sulfato de magnésio, ilustrado na Figura 6, é o mais severo. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 6 – Ataque de sulfato na base de um pilar de concreto armado



Fonte: Delatte (2009).

No ataque por sulfatos em concreto são características a aparência esbranquiçada e fissuras mapeadas, são expansões generalizadas ao longo do elemento. Geralmente, a deterioração se inicia nos cantos e arestas, as fissuras vão progredindo até que o concreto chegue a uma condição frágil. É uma patologia bem severa (NEVILLE, 2015).

## 2.4 Lixiviação e eflorescência

Souza e Ripper (2009) e Fusco (2012) elucidam que a lixiviação consiste na dissolução e arraste do hidróxido de cálcio existente na pasta de cimento Portland endurecida. Esse processo ocorre devido à percolação de água através do interior do concreto, provocando o aumento da porosidade e a diminuição do pH no mesmo. Não há risco de corrosão das armaduras se a massa de concreto ficar permanentemente saturada, mas se houver períodos de secagem, a mesma poderá ocorrer.

Ainda segundo Fusco (2012), a eflorescência é um dos sinais típicos da lixiviação, são depósitos de sais na superfície do concreto. A mesma é obtida por evaporação, segundo a reação da equação 4.



Neville (2015) acrescenta que além de situações onde possa ocorrer evaporação, a eflorescência, ilustrada na Figura 7, é vista através de fissuras ou juntas mal executadas. O carbonato de cálcio é formado pela reação do hidróxido de cálcio com dióxido de carbono, encontrado na forma de um depósito esbranquiçado.

Figura 7 – Eflorescência no concreto armado



Fonte: Delatte (2009).

Helene (1992) afirma que as pinturas impermeabilizantes reduzem significativamente a lixiviação. Este mecanismo de proteção consiste na formação de uma película contínua e semiflexível, atuando como barreira de baixa permeabilidade à água, vapor d'água e a gases. As pinturas têm flexibilidade superior à do concreto e seguem pequenas movimentações estruturais, mas requerem superfície homogênea e lisa, com poros de abertura máxima de 0,1 mm.

## 2.5 Sulfato no esgoto

Na sua forma elementar, o enxofre não pode ser utilizado por organismos superiores. Para tornar possível a sua assimilação, é necessário que os microrganismos oxidem a sulfa elementar a sulfatos (SHIRAKAWA, 1994).

A forma mais difundida e estável dos compostos de enxofre é o íon sulfato. Ele pode ser encontrado em diversos tipos de águas residuárias, como no esgoto sanitário, na concentração de 20 a 50 mg/L e também em descartes industriais, com concentrações na faixa de 12000 a 35000 mg/L (MOCKAITIS, 2008).

De acordo com a ABNT NBR 12655:2015, os concretos expostos a soluções ou solo contendo sulfatos devem ser preparados com cimento que seja resistente a sulfatos, e ainda atender aos valores estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos requisitos de qualidade para estruturas de concreto

Condição de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) presente no solo	Sulfato solúvel ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) presente na água	Máxima relação a/c em massa, para concreto com agregado normal	Resistência mínima à compressão (concreto com agregado normal ou leve)
	% da massa	ppm		MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

Fonte: ABNT NBR 12655:2015.

O método padrão para análise de águas e águas residuárias (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater), apresenta os métodos de análise para quantificar a concentração de sulfatos, os quais são: cromatografia iônica, eletroforese capilar, método

gravimétrico, método turbidimétrico e método automatizado de azul de metil timol (APHA et all, 2017).

Segundo APHA *et all* (2017), os métodos de cromatografia iônica eletroforese capilar são adequados para concentrações de sulfato acima de 0,1 mg/L. O método gravimétrico é aplicável para concentrações acima de 10 mg/L. O método turbidimétrico é indicado para concentrações de sulfato entre 1 e 40 mg/L. E o método automatizado de azul de metil timol é utilizado para analisar uma grande quantidade de amostras, podendo analisar mais de 30 amostras por hora.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida estabelecendo as seguintes etapas:

- A descrição do local para a coleta das amostras do agregado e a escolha do cimento;
- A caracterização física dos materiais utilizados na argamassa;
- A caracterização mineralógica do agregado gnáissico;
- O ensaio de expansibilidade em barras de argamassa atacadas por sulfatos;
- O estudo de caso da inspeção de uma Estação de Tratamento de Esgoto.

#### 3.1 Escolha dos materiais para realização da análise de reação por sulfatos

O agregado miúdo escolhido para a realização dos ensaios e da análise de reação por sulfatos é o gnaiss, extraído pelo Grupo Pedreira Santo Antônio. A mineradora, que mais produz o agregado na região, está localizada nas coordenadas geográficas 21°33'25"S e 45°22'12"W, na cidade de Varginha, na região sul de Minas Gerais, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Localização geográfica do Grupo Pedreira Santo Antônio



Fonte: Google Earth (2019).

O tipo de cimento escolhido foi o CP V ARI, do fabricante Holcim. Como, na produção do cimento, o clínquer é misturado com o gesso, a gipsita ( $\text{Ca}_2\text{SO}_3$ ) que contém o

sulfato, isso pode interferir muito e encobrir a reação em análise. Assim, como o propósito é utilizar um cimento mais puro, o CP V contém um percentual bem menor de adições.

### 3.2 Caracterização física dos materiais componentes das argamassas

A classificação granulométrica do agregado miúdo foi feita conforme estabelecida pela ABNT NBR 13583:2014.

A massa específica do agregado foi determinada seguindo as recomendações estabelecidas pela ABNT NBR NM 53:2009, utilizando fragmentos graúdos. A Figura 9 mostra a balança hidrostática, método empregado na realização deste ensaio, e a massa submersa.

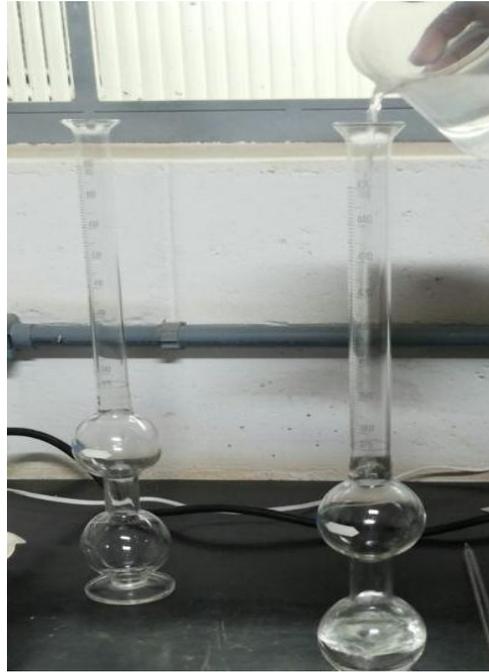
Figura 9 – Procedimentos para obtenção da massa específica do agregado



Fonte: a autora (2019).

Para a obtenção da massa específica do cimento, empregou-se a metodologia da ABNT NBR NM 23:2000. A Figura 10 mostra o frasco de Chapman, utilizado para a realização deste ensaio.

Figura 10 – Frasco de Chapman utilizado no ensaio de massa específica do cimento



Fonte: a autora (2019).

### **3.3 Características mineralógicas dos gnaisses da Pedreira Santo Antônio**

As características mineralógicas dos gnaisses foram identificadas em um estudo realizado pelo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, fornecido pela Pedreira Santo Antônio e estão descritas na seção 4.2.

### **3.4 Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfatos de sódio**

O ensaio foi realizado seguindo a ABNT NBR 13583:2014, a qual estabelece o método para a determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.

#### **3.4.1 Equipamentos utilizados**

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram:

- Balança;
- Moldes e acessórios;
- Espátula;
- Soquete;
- Misturador mecânico;
- Estufa;
- Comparador de comprimento (extensômetro);
- Barra padrão para verificação do comparador de comprimento;
- Recipientes para armazenagem dos corpos de prova;
- Medidores de pH.

#### 3.4.2 Classificação dos materiais utilizados

A ABNT NBR 13583:2014 estabelece as quantidades e as frações granulométricas do agregado miúdo a serem utilizadas na mistura da argamassa, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Frações do agregado miúdo

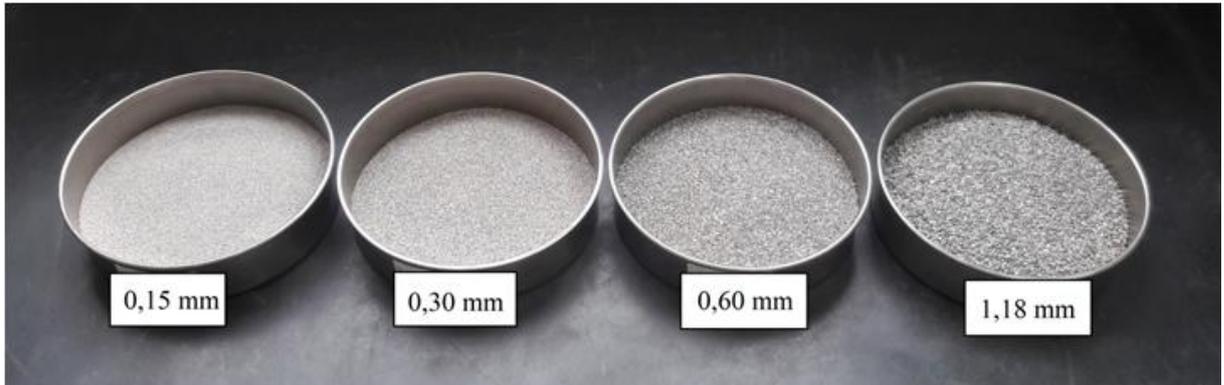
<b>Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)</b>		<b>Massa (g)</b>
Passante	Retido	
2,36 mm	1,18 mm	400
1,18 mm	0,60 mm	400
0,60 mm	0,30 mm	400
0,30 mm	0,15 mm	400

Fonte: a autora (2019).

#### 3.4.3 Produção das barras de argamassa em laboratório

O traço da argamassa para os materiais secos é de uma parte de cimento para 3,2 partes de areia de gnaiss composta das quatro frações, em massa. Para confeccionar a argamassa foram misturados  $(500 \pm 0,4)$  gramas de cimento e aproximadamente 1600 gramas de areia de gnaiss, sendo  $(400 \pm 0,3)$  gramas de cada fração, conforme apresentadas na Figura 11. A relação água/cimento é 0,60 e, portanto, a quantidade de água de mistura em massa é  $(300 \pm 0,2)$  gramas.

Figura 11 – Frações granulométricas produzidas do gnaiss



Fonte: a autora (2019).

Cada mistura foi suficiente para confeccionar quatro corpos de prova, foram necessárias duas misturas para cada amostra. Logo, foram produzidas duas séries de quatro barras para cada ensaio.

A mistura mecânica foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7215:2019, conforme os passos detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Mistura mecânica

Passo	Atividade	Tempo	T. cumulado	Velocidade
1	Colocar a água	00:00:00	00:00:00	
2	Colocar o cimento durante o tempo determinado	00:00:30	00:00:30	Baixa
3	Colocar o agregado durante o tempo determinado	00:00:30	00:01:00	
4	Aumentar a velocidade	00:00:30	00:01:30	Alta
5	Desligar o misturador e limpar com espátula	00:00:30	00:02:00	Nula
6	Descansar a massa	00:01:00	00:03:00	
7	Ligar o misturador	00:01:00	00:04:00	Alta

Fonte: a autora (2019).

Colocou-se inicialmente na cuba toda a quantidade de água, adicionando o cimento em seguida, conforme a Figura 12. O cronômetro foi acionado no momento em que o cimento foi colocado em contato com a água de mistura, esse momento foi registrado. A mistura destes materiais foi feita com o misturador na velocidade baixa, durante 30 segundos.

Figura 12 – Adição do cimento no misturador mecânico



Fonte: a autora (2019).

Após este tempo, sem paralisar a operação de mistura, iniciou-se a colocação das quatro frações do agregado previamente misturadas, com o cuidado de que fossem colocadas gradualmente durante o tempo de 30 segundos. Mudou-se para a velocidade alta e misturou-se os materiais nesta velocidade durante 30 segundos. Desligou-se o misturador durante 90 segundos. Nos primeiros 30 segundos, retirou-se, com o auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba. Durante o tempo restante (60 segundos), a argamassa ficou em repouso na cuba. Ligou-se o misturador na velocidade alta, por mais 60 segundos.

Os moldes foram preparados antes de efetuar a mistura dos materiais e tiveram seus comprimentos efetivos determinados, medindo 25 mm de lado e 285 mm de comprimento, com seção quadrada. Foi feita a identificação de cada unidade do molde, as quais correspondem a cada corpo de prova, para fazer os registros dos valores correspondentes. As superfícies internas foram levemente untadas com óleo mineral. Colocou-se os pinos de medida, com o cuidado de mantê-los sempre limpos e livres de óleo ou graxa.

A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após o amassamento e com a maior rapidez possível. Para isso, foi necessário que o recipiente que continha a argamassa estivesse junto aos moldes durante o adensamento. A colocação da argamassa nas formas foi feita com o auxílio da espátula, em duas camadas aproximadamente iguais, cada uma adensada pelo soquete. A argamassa precisou ser adensada junto aos cantos, aos pinos e ao longo da superfície do molde, para a obtenção de corpos de prova homogêneos e sem vazios. A camada superior da argamassa, depois de adensada, foi rasada com o auxílio de uma régua

metálica ou espátula, fazendo deslizar sobre a forma em direção normal à régua, dando-lhe também um ligeiro movimento de vaivém. A Figura 13 ilustra os corpos de prova já moldados.

Figura 13 – Corpos de prova moldados



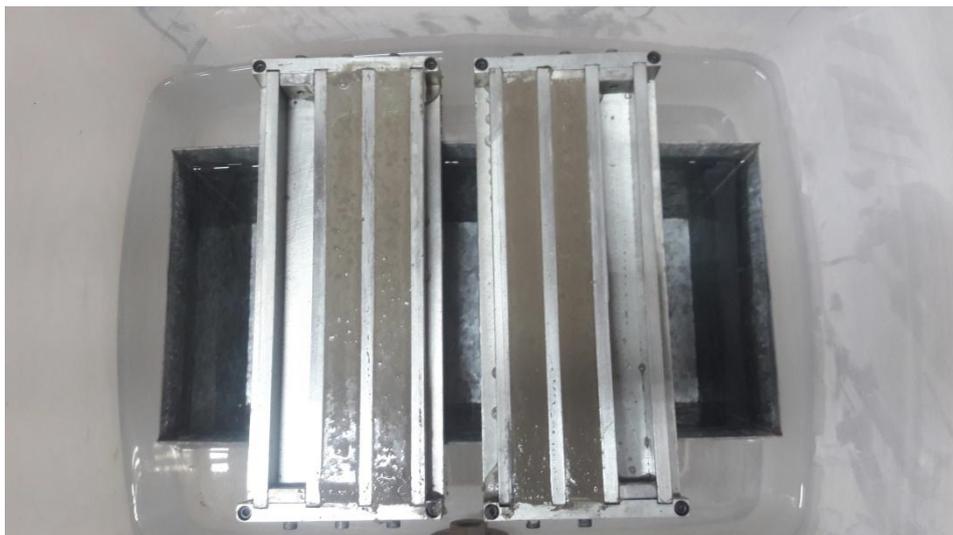
Fonte: a autora (2019).

Os corpos de prova são submetidos a um período de cura inicial ao ar, a um período intermediário em água saturada com cal e a um período final na estufa em água saturada com cal e em solução agressiva de sulfato de sódio.

#### 3.4.3.1 Cura inicial ao ar (2 dias)

Logo após a moldagem, os corpos de prova foram colocados em um recipiente simulando uma câmara úmida, a  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  onde precisaram permanecer por 48 horas, como mostra a Figura 14. Os oito corpos de prova referentes a cada amostra foram ser agrupados em séries de quatro, sendo cada uma das séries relativa a um tipo de cura final (água e solução).

Figura 14 – Corpos de prova em cura inicial



Fonte: a autora (2019).

#### 3.4.3.2 Cura intermediária em água (12 dias)

Terminado o período inicial de cura, os oito corpos de prova foram retirados das formas, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Corpos de prova após a desmoldagem



Fonte: a autora (2019).

Os mesmos foram imersos, separados entre si, em um recipiente contendo água saturada com cal, conforme a Figura 16, onde precisaram permanecer por mais 12 dias.

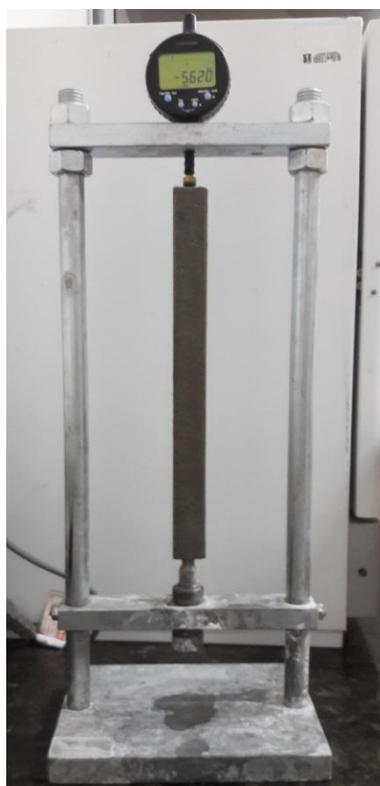
Figura 16 – Corpos de prova em cura intermediária



Fonte: a autora (2019).

Completado este período, os corpos de prova foram retirados do tanque de cura e foram feitas as leituras iniciais ( $L_i$ ) do comprimento de cada barra, no extensômetro mostrado na Figura 17, registrando-se os valores nas fichas correspondentes.

Figura 17 – Leitura inicial do corpo de prova no extensômetro



Fonte: a autora (2019).

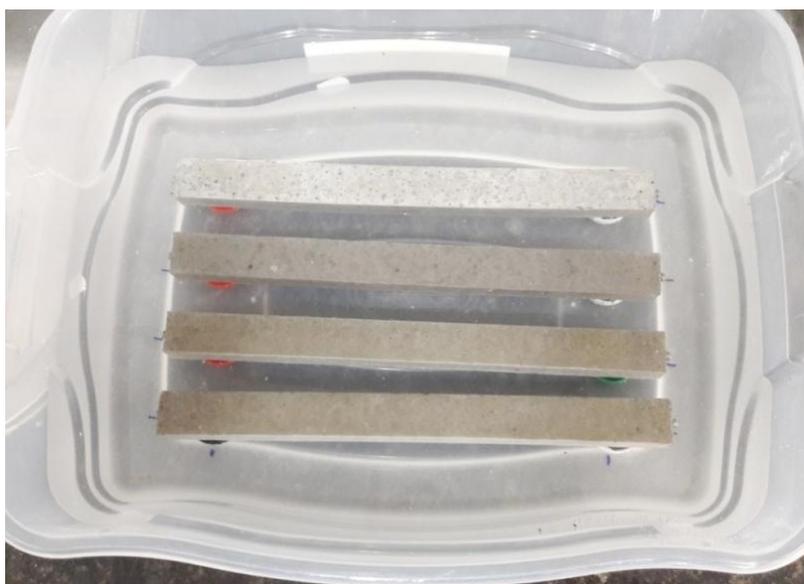
O comparador foi ajustado por meio da barra-padrão antes e depois de fazer as leituras de cada grupo de corpos de prova. Os corpos de prova foram colocados no comparador sempre com a mesma extremidade voltada para cima, toda vez que foi determinado o seu comprimento. As medidas do comprimento foram feitas girando-se vagarosamente os corpos de prova. A menor leitura observada foi anotada. Após as leituras iniciais, as barras foram acondicionadas nos recipientes adequados, os quais foram levados às condições de cura final.

#### 3.4.3.3 Cura final em água saturada com cal e em solução agressiva de sulfato de sódio (42 dias)

As duas séries de quatro corpos de prova cada, correspondentes a cada amostra ensaiada, foram separadas, destinando-se uma delas ao recipiente contendo a água saturada com cal e a outra ao recipiente hermético contendo o volume estabelecido da solução agressiva.

Os corpos de prova foram colocados assentados sobre dois apoios de pequena seção, mostrados na Figura 18, de modo que as superfícies inferiores das barras não ficaram em contato com o recipiente, e sim permanentemente banhadas pela solução. Os apoios possuem entre 1,0 a 1,5 centímetros de altura em relação ao fundo do recipiente.

Figura 18 – Armazenamento dos corpos de prova



Fonte: a autora (2019).

Os corpos de prova precisam ficar totalmente submersos na solução de cura, com uma camada livre de solução superior a 1,5 centímetros, de forma que todos os lados das barras fiquem livremente banhados pela solução. O mesmo acondicionamento foi dado aos corpos de prova submersos na solução de água saturada com cal.

Após a completa colocação das barras, os recipientes, tanto o que contem a solução de sulfato de sódio quanto o que contem água saturada com cal foram hermeticamente fechados para evitar a evaporação.

Os recipientes foram levados para a estufa, conforme mostra a Figura 19, onde permaneceram sob regime de temperatura constante de  $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$  ao longo do ensaio.

Figura 19 – Corpos de prova em cura final



Fonte: a autora (2019).

#### 3.4.4 Medição dos comprimentos das barras – Idades de medição

As idades para a realização das medições são de 14 dias, 28 dias e 42 dias. Elas são contadas a partir do instante em que os corpos de prova são expostos às condições de cura final.

Nas datas correspondentes às medições das barras, os recipientes foram retirados da estufa, e os corpos de prova retirados dos recipientes, colocados sobre a bancada de medição,

próximos ao comparador de comprimento, e deixados em ambiente de  $(23 \pm 2)$  °C por 10 minutos, para estabilização da temperatura.

Após 10 minutos, os corpos de prova foram tomados um a um e medidos no extensômetro, sempre na mesma posição relativa, com seu resultado devidamente registrado, dentro de no máximo 5 minutos.

Os corpos de prova foram colocados no comparador sempre com a mesma extremidade voltada para cima, sempre que determinado o seu comprimento. As medidas do comprimento foram feitas girando-se vagarosamente os corpos de prova. Anotou-se a menor leitura observada.

A ABNT NBR 13583:2014, orienta observar o aspecto das barras, nas idades de medição, e registrar toda e qualquer anomalia apresentada, como, por exemplo:

- Fissuração das barras;
- Intensidade e tamanho das fissuras;
- Desagregação parcial, total ou também o empenamento das barras;
- Alterações na temperatura de cura que ocorreram ao longo do ensaio;
- Evaporação da água e se teve a necessidade de complementação;
- Impossibilidade de leitura com o extensômetro e descrever qual outro instrumento de medida foi utilizado.

Caso ocorra quebra ou desagregação total de alguma barra, é recomendado anotar a quantidade de barras a que a média se refere. Recomenda-se também anotar os números das barras que não foram consideradas para efeito da média em função de quebra.

### **3.5 Estudo de caso: quantificação da concentração de sulfatos em amostra de esgoto**

A estrutura de concreto armado analisada foi escolhida com base em indícios de eventuais percentuais de sulfatos comuns em galerias e sistemas de esgoto. A mesma trata-se de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) no município de Coqueiral, Minas Gerais.

A ETE, apresentada nas figuras 20 e 21, está em operação há 20 anos e foi escolhida com o intuito de estudar uma obra local.

O tratamento do esgoto é feito parcialmente, e consiste na separação da parte mais sólida da parte líquida, resultando em um tratamento de cerca de 40% do esgoto.

Figura 20 – ETE no município de Coqueiral – MG



Fonte: a autora (2019).

Figura 21 – ETE no município de Coqueiral – MG



Fonte: a autora (2019).

### 3.2.1. Escolha do método

O método escolhido para analisar a amostra de esgoto em estudo foi o turbidimétrico, pois ele é amplamente aceito, é de rápida execução e pela disponibilidade de equipamentos utilizados no mesmo. O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos do Standard Methods for the Examination of Water and Wasteware (2017).

### 3.2.2. Coleta da amostra

As amostras foram coletadas na ETE da cidade de Coqueiral, no dia 02 de outubro de 2019. As mesmas foram retiradas da caixa de recebimento de esgoto, mostrada na Figura 22, e armazenadas em recipiente plástico com tampa. Após a coleta, os recipientes foram levados para refrigeração no laboratório até o dia seguinte, quando ocorreu a execução do ensaio.

Figura 22 – Caixa de recebimento da ETE de Coqueiral - MG



Fonte: a autora (2019).

### 3.2.3. Execução do ensaio de determinação do teor de sulfatos em laboratório

As amostras encaminhadas ao laboratório foram preparadas para a realização do ensaio para a determinação do teor de sulfatos, seguindo os procedimentos estabelecidos pelo método turbidimétrico.

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram:

- Agitador e bastão magnético;
- Espátula;
- Cronômetro;

- Béquer de 300 mL
- Erlenmeyers de 250 mL;
- Pipetas volumétricas de 5, 10 e 100 mL;
- Balão volumétrico de 100 e 1000 mL;
- Espectrofotômetro.

#### 3.2.4. Preparação das soluções reagentes

Foram preparadas três soluções:

- Solução tampão A: é utilizada quando a concentração de sulfato é maior que 10 mg/L. Foram dissolvidas 30 g de cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 5 g de acetato de sódio ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), 1 g de nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ), 20 mL de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 99%) em 500 mL de água destilada e completou-se o volume para 1000 mL;
- Solução tampão B: é utilizada quando a concentração de sulfato é menor que 10 mg/L. Foram dissolvidas 30 g de cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 5 g de acetato de sódio ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), 1 g de nitrato de potássio ( $\text{KNO}_3$ ), 0,111 g de sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e 20 mL de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 99%) em 500 mL de água destilada e completou-se o volume para 1000 mL;
- Solução padrão de sulfato: pesou-se 0,1479 g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  anidro e transferiu-se para um béquer de 300 mL contendo 100 mL de água destilada. Dissolveu-se e transferiu-se para um balão volumétrico de 1000 mL e completou-se o volume.

Com as soluções preparadas, separou-se cristais de cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ), conforme mostrados na Figura 23, e prosseguiu-se os ensaios do método turbidimétrico.

Figura 23 – Soluções reagentes



Fonte: a autora (2019).

### 3.2.5. Preparação da curva de calibração de $\text{SO}_4^{2-}$

Foram preparadas soluções padrões com diferentes concentrações utilizando balões volumétricos de 100 mL, e as transferindo para Erlenmeyers de 250 mL. Em cada Erlenmeyer, foram adicionadas 20 mL da solução tampão A, pois a concentração de sulfato das amostras foi maior que 10 mg/L. Preparou-se também um padrão “branco”, com água destilada, para a calibração do espectrofotômetro. A Figura 24 apresenta as soluções preparadas.

Figura 24 – Soluções preparadas



Fonte: a autora (2019).

A curva de calibração foi construída iniciando-se pelo padrão “branco”. Nos demais padrões, adicionou-se 0,5 g de cristais de  $\text{BaCl}_2$  e deixou-se agitar por  $60 \pm 2$  segundos, no agitador magnético (Figura 25) com velocidade constante.

Figura 25 – Agitador magnético



Fonte: a autora (2019).

Após a agitação, transferiu-se a solução do Erlenmeyer para uma cubeta e esperou-se  $5 \pm 0,5$  minutos. Efetuaram-se as leituras de turbidez no espectrofotômetro, com comprimento de igual a 420 nm, conforme a Figura 26.

Figura 26 – Espectrofotômetro



Fonte: a autora (2019).

A concentração de sulfato, em mg/L, foi encontrada através da equação da reta:

$$y = Bx + A \quad (5)$$

onde,

$y$  é a leitura do espectrofotômetro;

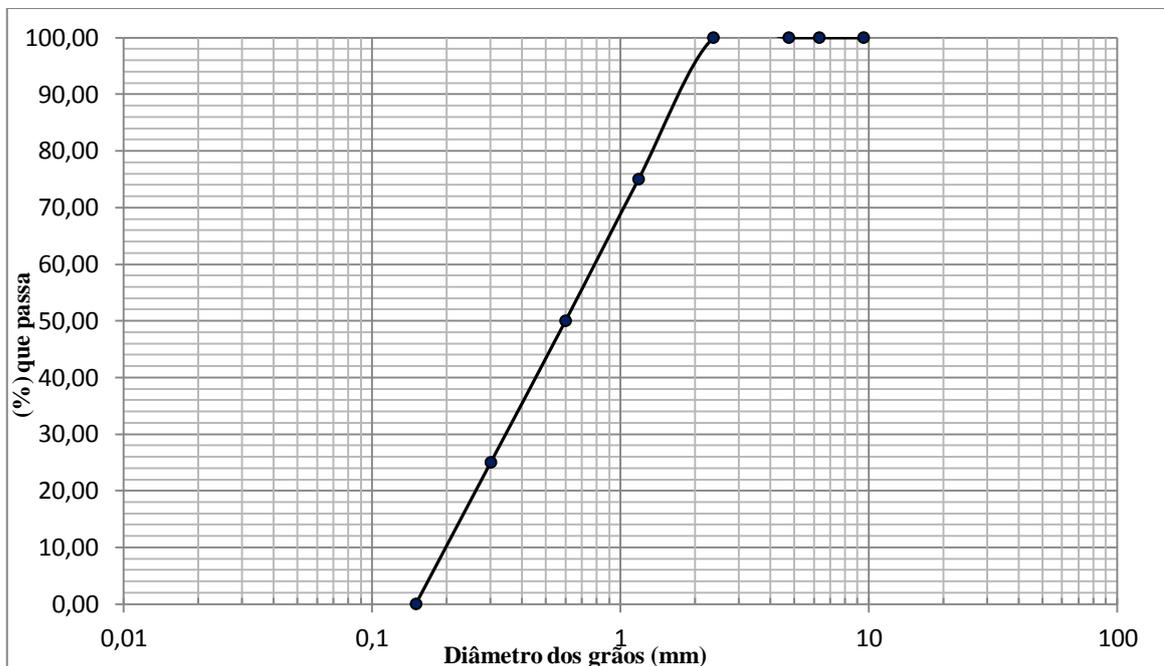
$x$  é a concentração de sulfato, em mg/L.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Determinação dos índices físicos do agregado gnáissico e do cimento

A classificação granulométrica do agregado miúdo, conforme estabelecida pela ABNT NBR 13583:2014, gerou a curva granulométrica linear mostrada na Figura 27.

Figura 27 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: a autora (2019).

A massa específica do agregado foi determinada utilizando fragmentos graúdos do gnaisse, seguindo a metodologia empregada pela ABNT NBR NM 53:2009 e, a massa

específica do cimento, pela ABNT NBR NM 23:2000. Os índices obtidos estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Massa específica do agregado e do cimento

<b>Material</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Agregado - gnaisse	2,67
Cimento CP V ARI - Holcim	3,06

Fonte: a autora (2019).

#### 4.2 Caracterização mineralógica do agregado gnáissico

A difração de raios X faz uma varredura na amostra e detecta o mineral existente no agregado, identificando-os por picos. O estudo foi realizado pelo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e foi efetuado através do método do pó, através do difratômetro de raios X. A Tabela 5 mostra o resultado, o qual foi fornecido pela Pedreira Santo Antônio.

Tabela 5 – Minerais identificados no gnaisse

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula química</b>
Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Almandina	Al <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Albita	(Na,Ca)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Microclínio	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Biotita	K <sub>0,78</sub> Na <sub>0,22</sub> Mg <sub>1,63</sub> Fe <sub>0,85</sub> Ti <sub>0,33</sub> Al <sub>1,35</sub> Si <sub>2,84</sub> O <sub>11</sub> (OH)

Fonte: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2018).

A amostra detalhada é apresentada no anexo A. No difratograma de raios X, foi possível identificar que o mineral que possui maior pico é o quartzo.

A Tabela 6 apresenta os elementos químicos presentes no gnaisse e suas respectivas porcentagens. Foi feita a média de quatro amostras. A mesma foi retirada da análise química também fornecida pela Pedreira Santo Antônio e realizada pela SGS Geosol Laboratórios LTDA, a qual consta no anexo B.

Tabela 6 – Porcentagem média dos minerais identificados no gnaiss

<b>Mineral</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	64,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,02
CaO	2,24
MgO	4,43
TiO <sub>2</sub>	0,85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17
Na <sub>2</sub> O	1,70
K <sub>2</sub> O	2,09
MnO	0,19

Fonte: SGS Geosol Laboratórios LTDA (2018).

A análise química e a difração de raios X não constaram sulfato. Como já visto, os sulfatos podem provir dos materiais que o compõe, ou do contato com solos ou águas ricas neste agente. Neste caso, a sua presença no agregado já está descartada, o que diminui a chance de produzir o ataque pelos sulfatos devido à composição do concreto. Ressalta-se que, conforme dito anteriormente, o ataque por sulfatos tem ação expansiva, o qual gera tensões capazes de fissurar, trincar e até mesmo levar a estrutura à ruptura e possível colapso.

### **4.3 Determinação da expansibilidade e verificação de eventuais ataques por sulfatos no concreto**

As barras foram confeccionadas com o traço obtido na Tabela 7, o qual é estabelecido pela ABNT NBR 13583:2014.

Tabela 7 – Traço da argamassa

<b>Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)</b>		<b>Massa (g)</b>
Passante	Retido	
2,36 mm	1,18 mm	400
1,18 mm	0,60 mm	400
0,60 mm	0,30 mm	400
0,30 mm	0,15 mm	400
Massa de agregado múdo		1600
Massa de cimento		500
Massa de água destilada		300

Fonte: a autora (2019).

As tabelas 8 e 9 foram montadas com a expansão de cada série de barras de argamassa produzidas, a partir dos valores anotados em cada medição. A expansão de cada barra foi calculada pela diferença entre o valor medido em milímetros, na idade correspondente, e a leitura inicial da mesma barra, também em milímetros, divididos pelo seu comprimento efetivo. Como a expansão é dada em porcentagem, multiplicou-se o resultado por 100. A expansão média foi obtida pela média aritmética das expansões individuais, em porcentagem, dos quatro corpos de prova em cada série.

Tabela 8 – Expansão das barras em sulfato de sódio

IDADE (Semanas)	BARRA PADRÃO (mm)	Corpos de Prova	TRAÇO				
			SULFATO DE SÓDIO (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )				
			ZERO	MEDIDO	REAL	%	%/n
0	-5,498	1	-0,003	-5,959	-5,956		
		2	-0,005	-5,316	-5,311		
		3	-0,008	-5,842	-5,834		
		4	-0,003	-6,025	-6,022		
14	-5,534	1	0,005	-6,032	-6,037	0,016	0,015
		2	0,008	-5,386	-5,394	0,016	
		3	0,006	-5,917	-5,923	0,019	
		4	-0,001	-6,088	-6,087	0,010	
28	-5,529	1	0,002	-6,121	-6,123	0,048	0,041
		2	-0,011	-5,480	-5,469	0,045	
		3	-0,020	-6,002	-5,982	0,041	
		4	-0,020	-6,166	-6,146	0,033	
42	-5,529	1	0,013	-6,345	-6,358	0,130	0,113
		2	-0,012	-5,692	-5,680	0,119	
		3	-0,010	-6,160	-6,150	0,100	
		4	-0,001	-6,345	-6,344	0,102	

Fonte: a autora (2019).

Tabela 9 – Expansão das barras em água saturada com cal

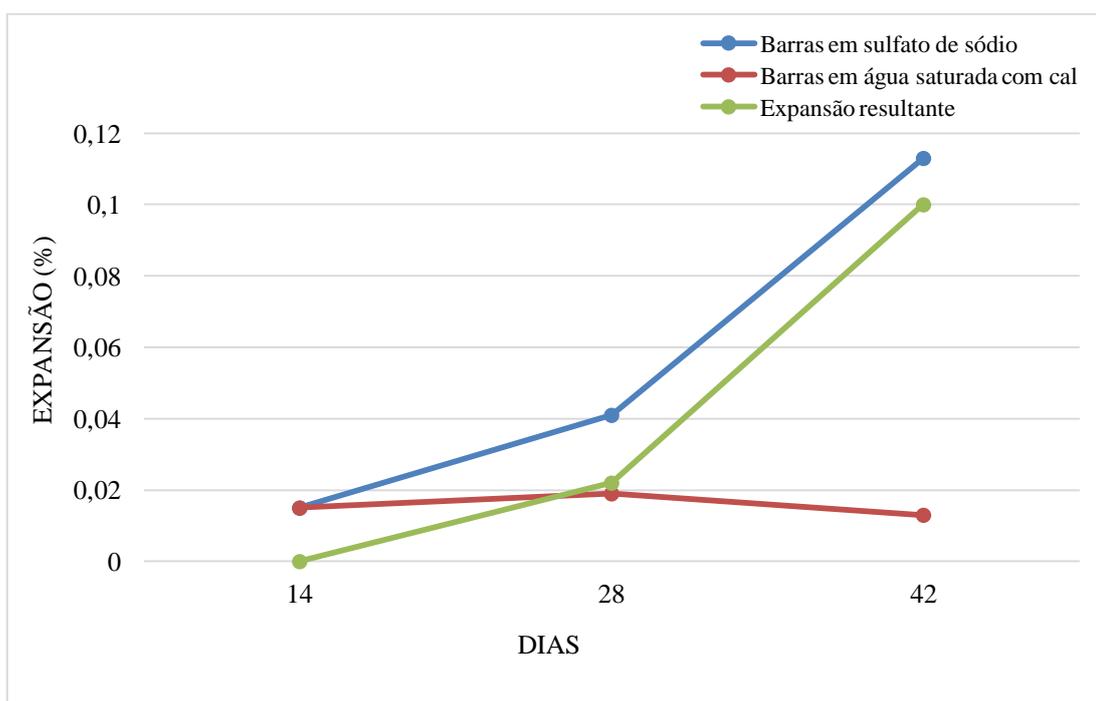
IDADE (Semanas)	BARRA PADRÃO (mm)	TRAÇO					
		Corpos de Prova	ÁGUA SATURADA COM CAL				
			ZERO	MEDIDO	REAL	%	%/n
0	-5,542	1	-0,005	-6,314	-6,309		
		2	-0,002	-6,156	-6,154		
		3	0,001	-5,919	-5,920		
		4	0,003	-5,620	-5,623		
14	-5,526	1	0,008	-6,336	-6,344	0,018	0,015
		2	0,004	-6,168	-6,172	0,012	
		3	-0,002	-5,951	-5,949	0,016	
		4	0,001	-5,642	-5,643	0,013	
28	-5,525	1	0,012	-6,335	-6,347	0,019	0,019
		2	0,008	-6,177	-6,185	0,017	
		3	0,004	-5,954	-5,958	0,019	
		4	0,013	-5,650	-5,663	0,020	
42	-4,783	1	0,001	-5,589	-5,590	0,014	0,013
		2	0,001	-5,426	-5,427	0,011	
		3	0,002	-5,194	-5,196	0,012	
		4	0,002	-4,906	-4,908	0,015	

Fonte: a autora (2019).

Com as expansões individuais e médias calculadas, foi possível calcular a expansão resultante. A mesma foi encontrada subtraindo a expansão média das barras curadas em solução agressiva de sulfato de sódio, em porcentagem (%), pela expansão média das barras curadas em água saturada com cal, também em porcentagem (%).

A expansão resultante encontrada, demonstrada na Figura 28, é expressa pelo aumento da expansão das barras de argamassa devido ao ataque da solução de sulfato de sódio em relação à expansão das barras curadas em água saturada com cal.

Figura 28 – Expansão resultante das barras de argamassa



Fonte: a autora (2019).

A expansão resultante em 42 dias foi de 0,10%. A ABNT NBR 13583:2014 não estabelece limites para a expansão. Não houve fissuras e empenamentos nas barras, as mesmas se mostraram intactas.

Kulisch (2011) relata que apesar da ABNT NBR 13583:2014 não estabelecer o limite de expansibilidade, é utilizado usualmente o limite de 0,03% e concluiu em seu estudo que para teores muito baixos de sulfatos este ensaio é insuficiente.

Silva *et all* (2017), realizaram a avaliação da variação dimensional de corpos de prova de argamassa de diferentes tipos de cimentos submetidos ao ataque por ácido sulfúrico e sulfato de sódio. As argamassas estudadas referentes ao ataque por sulfato de sódio e utilizando também o cimento CP V, obtiveram expansões resultantes de 0,012% aos 51 dias e de 0,148% aos 95 dias. Os corpos de prova imersos em soluções de sulfato de sódio e água saturada com cal não apresentaram degradação tão avançada quanto os imersos no ácido sulfúrico, concluindo que a ABNT NBR 13583:2014 não é a norma mais adequada para avaliar o cimento a ser utilizado em ambientes com a presença de ácido sulfúrico, como em estações de tratamento de esgoto e indústrias, pois o sulfato de sódio não é tão agressivo quanto o ácido sulfúrico.

A pesquisa realizada por OLIVEIRA *et all* (2018), sobre a análise do ataque por sulfatos em argamassas de cimento geopolimérico, obteve um resultado interessante sobre o

nível de expansibilidade ao constatar que não houve variação significativa entre as idades de medição, realizada durante 182 dias. O estudo também evidenciou que o sulfato de sódio não altera a estrutura do geopolímero. A expansão resultante chegou a 0,12% e estabilizou em 0,10%, valor aproximado ao encontrado na determinação da expansibilidade realizada acima.

#### 4.4 Análise da quantidade de sulfatos existente na Estação de Tratamento de Esgoto

A curva de calibração construída com as soluções padrões na faixa de 2,5 a 50 mg/L obteve as leituras de absorvância da Tabela 10, realizadas no espectrofotômetro.

Tabela 10 – Curva de calibração

Concentração (mg/L)	Absorvância
2,5	0,023
5	0,032
10	0,06
25	0,196
50	0,417

Fonte: a autora (2019).

A leitura da amostra de esgoto obtida no espectrofotômetro foi de 0,241 de absorvância. Sendo  $A = -0,011255$  e  $B = 8,478 \times 10^{-3}$ , ambos os valores encontrados por regressão linear com os dados da curva de calibração da Tabela 10, calculou-se a concentração de sulfato:

$$x = \frac{[0,241 - (-0,011255)]}{8,479 \times 10^{-3}}$$

$$x = 29,75 \text{ mg/L}$$

A concentração de sulfatos encontrada na ETE de Coqueiral – MG está enquadrada como agressividade fraca nos limites estabelecidos pela ABNT NBR 12655:2015, não é potencialmente deletéria. Portanto, não foram propostos métodos para a recuperação da patologia de ataque por sulfatos.

Contudo, a estrutura apresenta uma manifestação patológica, a eflorescência (lixiviação), conforme mostram as figuras 29 e 30. Ela não é tão severa quanto o ataque por sulfato, mas deve ser tratada com o objetivo de evitar problemas futuros, prezando pela

manutenção e durabilidade da mesma. O método mitigador, conforme citado na seção 2.4, é fazer a impermeabilização da superfície da estrutura.

Figura 29 - Filtro de concreto com eflorescência



Fonte: a autora (2019).

Figura 30 - Filtro de concreto com eflorescência



Fonte: a autora (2019).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foram feitos estudos das patologias em estruturas de concreto armado, abordando com mais profundidade apenas o ataque por sulfatos. O ataque por sulfatos é uma patologia muito comum e muito importante de ser estudada e analisada. Neste ataque, são características as fissuras mapeadas porque são expansões generalizadas ao longo do elemento, é uma patologia bem severa.

Os ensaios físicos foram efetuados seguindo os padrões brasileiros normativos (abordados nos itens anteriores do presente trabalho).

Foram definidos os materiais com o objetivo de produzir barras de argamassa com agregados gnáissicos provenientes do município de Varginha – MG para a verificação do potencial expansivo do ataque em estudo.

Na análise mineralógica não foi detectado sulfatos. Não foi realizada a análise química do cimento utilizado. As barras de argamassa não apresentaram degradação. Assim, as expansões ocorridas, mesmo que não significativas comparadas aos trabalhos citados, são atribuídas ao cimento e não ao agregado.

É muito comum ter estruturas de ETE's deterioradas. O fato da concentração encontrada no estudo de caso ser enquadrada como fraca é positivo para a durabilidade da estrutura. No entanto, a mesma apresenta uma manifestação patológica, a lixiviação. Fazer a impermeabilização é uma correção para que o quadro não se agrave. Com o tempo, os materiais carbonáticos vão provocando fenômenos expansivos, o que requer bastante cuidado, pois pode levar a estrutura à fissuração.

Ao se definir os materiais de construção a serem utilizados em uma determinada obra, é importante considerar estudos qualitativos dos mesmos, com o objetivo de conhecê-los e identificar em qual aspecto pode ser danoso para a estrutura como um todo.

Por fim, é válido evidenciar a importância do conhecimento difundido sobre patologias em concreto armado entre os profissionais atuantes na construção civil. Quanto antes houver o diagnóstico e quanto mais preciso ele for, mais chances a estrutura terá de ser submetida a uma recuperação eficiente e de intervir antes que o problema se agrave.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA) et al. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 4500 – SULFATE. 23. ed. Washington: APHA, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13583**: Cimento Portland – Determinação da variação de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**: aspectos relativos ao projeto. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.
- COUTINHO, Joana de S. **Durabilidade**: ataque por sulfatos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: 2001.
- DAL MOLIN, Denise C. Coitinho. **Fissuras em estruturas de concreto armado**: Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.
- DELATTE, Norbert. **Failure, distress and repair of concrete structures**. 1. Ed. Canada: Elsevier science & technology, 2009.

FUSCO, Péricles B. **Tecnologia do concreto estrutural**: componentes, durabilidade, resistência mecânica, corrosão, compressão. 2. ed. São Paulo: Pini, 2012.

GOOGLE EARTH. **Localização geográfica da mineração do Grupo Pedreira Santo Antônio**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-21.55617734,-45.36854114,1026.01306497a,775.67943328d,35y,-42.75981759h,42.21690667t,360r>. Acesso em: 30 maio 2019.

HELENE, P. R. L. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

KULISCH, Daniele. **Ataque por sulfatos em estruturas de concreto**. Curitiba, 2011. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Paraná.

MEDEIROS, H. **Doenças concretas**. Revista técnica, São Paulo, n.160, p. 62-68, jul. 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. (4 ed. em Inglês). São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2014.

MOCKAITIS, G. **Redução de sulfato em biorreator operado em batelada e batelada alimentada sequenciais contendo biomassa granulada com agitação mecânica e “draft tube”**. São Carlos, 2008. 348 f. Dissertação de Mestrado em engenharia hidráulica e saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015.

OLIVEIRA, E. C. de; GODINHO, D. S. S.; BERNARDIN, A. M. **Análise do ataque por sulfatos em argamassas de cimento geopolimérico**. UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2018.

PEDREIRA SANTO ANTÔNIO. **Nossa história**. Disponível em: <http://pedreirasantoantonio.com.br/a-nova-pedreira/nossa-historia/>. Acesso em: 30 maio 2019.

SHIRAKAWA, M. A. **Estudo da biodeterioração do concreto por *Thiobacillus***. São Paulo, 1994. 137 f. Dissertação de Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

SILVA, M. S. A.; BONATTO, A. M.; ZANDOWSKI, J. J.; GODINHO, J. P.; LUCA, L. C. S.; MEDEIROS, M. H. F. **Avaliação da variação dimensional de corpos de prova de argamassa de diferentes tipos de cimentos submetidos ao ataque por ácido sulfúrico e sulfato de sódio**. Simpósio Paranaense de Patologia das Construções, 2017.

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. 5. tiragem. São Paulo: Pini, 2009.

## ANEXO A – Resultado da difração de raios X do gnaiss



### RESULTADO DE IDENTIFICAÇÃO DE FASES POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

RELATÓRIO: DRX 684/18

DATA: 12/12/18

CLIENTE: MINERAÇÃO SANTO ANTONIO DE VARGINHA LTDA

AMOSTRA: Amostra 2162-PSA-Passante em 1,2 mm

IDENT. LCT: 389-9076.HPF

#### 1. MÉTODO

O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X com detector sensível a posição.

A identificação das fases cristalinas, abaixo discriminadas, foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data e ICSD – Inorganic Crystal Structure Database.

#### 2. RESULTADOS

Os resultados obtidos estão listados na tabela abaixo:

ICDD	Mineral	Fórmula Química	Obs
01-083-0539	Quartzo	SiO <sub>2</sub>	
01-074-2019	Almandina	Al <sub>2</sub> Fe <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	
00-041-1480	Albita	(Na,Ca)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	
00-019-0932	Microclínio	KAIS <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	
01-076-0884	Biotita	K <sub>0,78</sub> Na <sub>0,22</sub> Mg <sub>1,83</sub> Fe <sub>0,85</sub> Ti <sub>0,33</sub> Al <sub>1,35</sub> Si <sub>2,84</sub> O <sub>11</sub> (OH)	

O difratograma obtido (cor vermelha), onde são assinaladas as linhas de difração correspondente(s) à(s) fase(s) identificada(s) (cada fase em uma cor distinta) é apresentado anexo.

Profa. Dra. Carina Ulsen  
Coordenadora do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora sênior

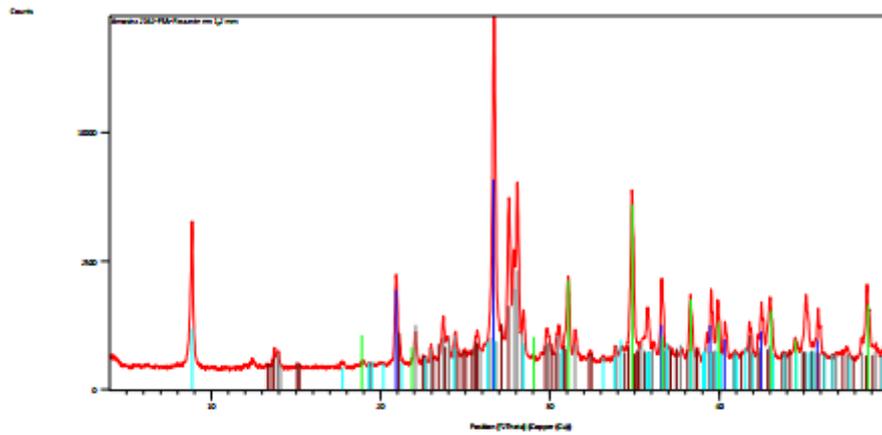
Dra. Juliana Lívi Antoniassi  
Pesquisadora



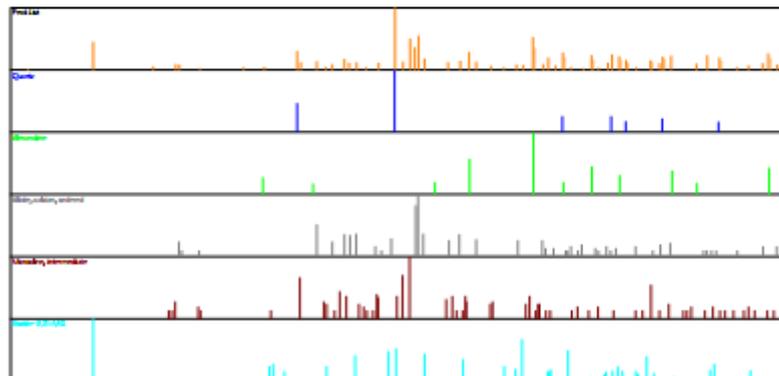
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
 Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
 Laboratório de Caracterização Tecnológica  
 Av. Prof. Melo Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br  
 Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



### DIFRATOGRAMA DE RAIOS X



### FASES IDENTIFICADAS



## ANEXO B – Resultado da análise química do gnaise



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

**CERTIFICADO DE ANÁLISES**  
**GQ1804697**
**Dados do Cliente**

**Nome:** MINERAÇÃO SANTO ANTONIO DE VARGINHA LTDA  
**Attn.:** Thassia Freitas  
**Endereço:** FAZ RIBEIRAO SANTANA S/N CAIXA POSTAL 32 ZONA RURAL 37002970 MG VARGINHA

**Referência do Lote de Amostras**

**Ref. Cliente:** Pedido 04/10/2018  
**Produto:** SILICATOS  
**Projeto:** Rochagem

**Número de Amostras:** 4  
**Data do Recebimento:** 05/10/2018  
**Data de Envio:** 23/10/2018  
**Completado Em:** 23/10/2018

**Referência Analítica**

**PHY01E:** LOI (Loss on ignition) - Perda ao fogo por calcinação da amostra a 405°C e/ou 1000°C  
**XRF79C:** Fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF

**Legenda**

<b>L.D.</b> = Limite de Detecção	<b>BLK</b> = Branco	<b>REP</b> = Replicata	<b>DUP</b> = Duplicata
<b>L.N.R.</b> = Listado e não Recebido	<b>I.S.</b> = Amostra Insuficiente	<b>N.A.</b> = Não Analisado	<b>STD</b> = Padrão
<b>I.N.F.</b> = Não reportado devido a interferentes		<b>OVR</b> = Não Analisado devido ao alto teor	

  
**Marcos Filipe Gonçalves Silva**  
**CRQ II 02202046**  
**Responsável Técnico**

Os ensaios foram realizados no SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespertino - MG - Brasil - CEP: 31208-000  
 Telefone +55 31 3045-0361 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br  
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABIS 1180 e ABIS 29611)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES  
GQ1804697

Análise	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	P2O5	Na2O	K2O
	XRF79C								
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Método									
Unidade									
Límite Detecção	0,10	0,10	0,01	0,01	0,10	0,01	0,01	0,08	0,01
BRANCO_PREP	98,3	<0,1	0,53	0,01	<0,1	0,02	0,01	0,12	<0,01
Am 2162_1-PSA-Adms de 1.2mm	62,3	15,5	9,46	2,29	2,85	0,74	0,13	1,92	2,29
Am 2162_2-PSA-F, em 1.2 e Ram 0.6mm	61,9	15,5	11,8	2,14	4,25	0,64	0,13	1,56	2,82
Am 2162_3-PSA-F, em 0.6 e Ram 0.3mm	60,2	15,8	12,7	2,87	4,97	0,63	0,13	1,37	1,67
Am 2162_4-PSA-Acabo de 0.3mm	59,5	16,9	10,9	2,45	4,65	1,28	0,27	1,93	2,29
* REF BRANCO_PREP	>99	<0,1	0,53	<0,01	<0,1	<0,01	0,01	<0,1	<0,01
* STD AMESQ80	58,4	15,5	8,23	4,82	4,12	1,15	0,21	2,95	2,58

Análise	MnO	LOI
	XRF79C	PIV01E
	%	%
Método		
Unidade		
Límite Detecção	0,01	-45,00
BRANCO_PREP	<0,01	-0,11
Am 2162_1-PSA-Adms de 1.2mm	0,16	-0,26
Am 2162_2-PSA-F, em 1.2 e Ram 0.6mm	0,19	-0,57
Am 2162_3-PSA-F, em 0.6 e Ram 0.3mm	0,22	-0,59
Am 2162_4-PSA-Acabo de 0.3mm	0,19	-0,18
* REF BRANCO_PREP		0,01
* STD SQ_878		0,01
* REF BRANCO_PREP	<0,01	
* STD AMESQ80	0,06	

Os ensaios foram realizados no SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespertino - MG - Brasil - CEP: 31.208-000  
 Telefone +55 31 3045-0361 Fax +55 31 3045-0323 www.sgsgeosol.com.br

Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABIS 21982 e ABIS 20911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.