



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VICTOR CUNHA PEREIRA PONTES

EFEITOS DOS SULFATOS NA DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

JOÃO PESSOA - PB

2019

VICTOR CUNHA PEREIRA PONTES

EFEITOS DOS SULFATOS NA DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Germano Toscano Moura.

JOÃO PESSOA - PB

2019

P813e Pontes, Victor Cunha Pereira.

Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto / Victor
Cunha Pereira Pontes. - João Pessoa, 2019.
126 f.

Orientação: Paulo Germano Moura.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Durabilidade. 2. Estrutura. 3. Íon sulfato. 4.
Agressividade. I. Moura, Paulo Germano. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

VICTOR CUNHA PEREIRA PONTES


EFEITOS DOS SULFATOS NA DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao corpo docente do Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal da Paraíba, aprovada em 25 de 09 de 2019.

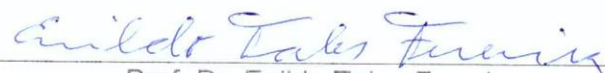
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Paulo Germano Toscano Moura
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UFPB

Aprovado.


Prof.^a Dr. Cibelle Guimarães Silva Severo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UFPB

Aprovado


Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UFPB

APROVADO


Prof. Dra. Andrea Brasiliano Silva

Matrícula Siape: 1549557

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente à Deus, em seguida aos meus pais, Sidney e Mércia, e aos amigos, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, à Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada. À trindade divina, por ser o sentido do existir e o motivo de viver. A Nossa Senhora, mãe protetora.

À minha família, em especial aos meus pais, Sidney e Mércia, que sempre lutaram por mim e proporcionaram as condições necessárias para vencer os obstáculos do dia-a-dia. Sempre se dedicaram a mim, com todo esforço, sacrifício e com muito amor, para garantir minha formação, e sempre dividindo comigo as dificuldades e alegrias para alcançar este objetivo.

Ao meu irmão Sidney Filho, que apesar da distância ele tem incentivado e me dado forças para continuar o curso e ter chegado até aqui.

Ao meu grande amigo Daniel Porto, que não mediu esforços para ajudar na correção e desenvolvimento deste trabalho, como também por ter sido um grande parceiro, de igual modo o meu primo Estevão Cunha na minha vida pessoal.

À Anny Karolliny, que durante anos na jornada do curso esteve comigo, ajudando, dando apoio, escutando meus choros e os sofrimentos passados pelas diversas etapas do curso, incentivando, com muito carinho e compreensão, pelo acolhimento singular e pelas palavras encorajadoras que fortaleceram minha caminhada. Agradeço pelas orações à minha vida e carreira profissional.

Agradeço aos amigos de graduação que ganhei e que partilharam dessa longa e dura jornada ao meu lado. Aos professores do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, em especial a Paulo Germano Toscano Moura, por aceitar orientar neste tema, como também a todos aqueles que trabalham na UFPB que, durante todos esses árduos anos de graduação, colaboraram diretamente e indiretamente para este trabalho de final de curso.

E por fim, agradeço à empresa ABC Construções, por intermédio de Adalberto Neto e ao engenheiro Edivaldo Miranda que me aceitaram no estágio e terem proporcionado a experiência e a vivência dentro de um canteiro de obras.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

Um dos campos de pesquisa mais destacados atualmente é o estudo da durabilidade dos materiais devido à sua importância econômica e ecológica e ao seu inter-relacionamento com as questões da qualidade e da satisfação do usuário, que se manifesta na exigência de manutenção de um adequado desempenho. O presente trabalho tem como objetivo a caracterização do ataque ao concreto por íons sulfatos, a influência na durabilidade, focalizando os mecanismos e os efeitos provocados nas estruturas construídas com este material. A agressividade do meio com a presença de sulfatos onde as estruturas de concreto poderão estar inseridas, pode reduzir a vida útil das mesmas significativamente em ambientes urbanos, marinhos, industriais, esgotos sanitários, entre outros. Estes íons promovem reações químicas com os compostos hidratados do cimento Portland que, em estágios avançados, provocam a formação de produtos expansivos que geram então a fissuração e desagregação do concreto. O argumento principal que serve de embasamento para este estudo é o de que a água tem uma importância na sinergia de degradação do concreto, e que para se produzir um concreto durável, deve-se reduzir a quantidade de água no traço e impedir seu acesso durante o tempo de utilização da estrutura. Outro ponto importante é com relação ao impacto econômico, já que os custos financeiros para recuperação de estruturas enterradas, normalmente demandam valores mais elevados do que em estruturas aéreas. Este trabalho procura analisar as melhores formas de se evitar ou minimizar os ataques de sulfatos nas estruturas de concreto. A metodologia deste trabalho se fez através de pesquisa bibliográfica, onde baseando-se nestas considerações, foi estudado e aprofundado o assunto sobre o comportamento do concreto frente ao ataque de sulfatos, onde verificou-se que pode-se aumentar a resistência do concreto contra o ataque de sulfatos através da: redução do fator a/c; com o uso de cimento resistente a sulfatos com baixo teor de aluminato tri-cálcico (C_3A); com a introdução de proporções adequadas de sílica ativa, cinzas volantes, escória granulada e microsílica; como também, em casos de um forte ataque, a utilização de uma película impermeável que impeça o contato dos agente deletérios com a estrutura em si. Pode-se constatar que a melhor proteção contra os ataques por sulfato é a qualidade do cimento, especificamente a baixa permeabilidade e o incremento do teor deste aglomerante por metro cúbico de concreto produzido.

Palavras-chave: Durabilidade; Estrutura; Íon Sulfato; Agressividade.

ABSTRACT

One of the most outstanding research fields today is the study of the durability of materials due to their economic and ecological importance and their interrelationship with the questions of quality and user satisfaction, which is manifested in the requirement of maintaining an adequate performance. This work has as objective the characterization of the attack on the concrete by sulfate ions, the influence on the durability, focusing on the mechanisms and the effects caused on the structures built with this material. The aggressiveness of the environment with the presence of sulphates where the concrete structures may be inserted, can significantly reduce their lifespan in urban, marine, industrial, sanitary sewage, among others. These ions promote chemical reactions with the hydrated compounds of Portland cement which, in advanced stages, cause the formation of expansive products that then generate the cracking and disintegration of the concrete. The main argument that underlies this study is that water is important in the synergy of concrete degradation, and that in order to produce durable concrete, the amount of water in the trace must be reduced and its access prevented during the utilization time of the structure. Another important point is related to the economic impact, since the financial costs for the restoration of buried structures usually demand higher values than in aerial structures. This paper seeks to analyze the best ways to prevent or minimize sulphate attacks on concrete structures. The methodology of this work was made through bibliographic research, which based on these considerations, was studied and deepened the subject on the behavior of concrete against the attack of sulfates, where it was found that it can increase the resistance of concrete against the sulfate attack through: reduction of a/c factor; using sulphate-resistant cement with low tri-calcium aluminate (C_3A) content; introducing appropriate proportions of active silica, fly ash, granulated slag and microsilica; Also, in case of a strong attack, the use of an impermeable film that prevents contact of the deleterious agents with the structure itself. It can be seen that the best protection against sulphate attacks is the quality of the cement, specifically the low permeability and the increase of the content of this binder per cubic meter of concrete produced.

Key words: Durability; Structure; Sulphate ion; Aggressiveness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Secção polida de um corpo-de-prova de concreto.....	20
Figura 2 – Consequências em relação a rugosidade e ao formato dos grãos.	22
Figura 3 – Distribuição dos cristais de hidróxido de Cálcio, Silicato de Cálcio Hidratado e de Etringita, na zona de transição até a pasta propriamente dita.	25
Figura 4 – Cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	30
Figura 5 – Placas hexagonais de hidróxido de cálcio.....	31
Figura 6 – Etringita com seu formato de agulhas	32
Figura 7 – Microestrutura do concreto: monossulfato e etringita.....	33
Figura 8 – Diagrama esquemático de uma estrutura marinha mostrando os processos ou mecanismos de transporte atuantes.	35
Figura 9 – Medidas conforme o desempenho	39
Figura 10 – Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho das estruturas de concreto.....	43
Figura 11 – Origem dos problemas patológicos.	44
Figura 12 – Esquema das causas físicas de deterioração	50
Figura 13 – Esquema das causas químicas da deterioração.....	51
Figura 14 – Machas superficiais no concreto devido à corrosão de armaduras por presença de umidade	53
Figura 15 – Trinca em estrutura de concreto.....	54
Figura 16 – Fissuras interconectadas em laje de concreto	55
Figura 17 – Corrosão na armadura de uma viga.....	57
Figura 18 – Ninho de concretagem de uma viga, originalmente encoberto por concreto que não penetrou entre a fôrma e as armaduras.....	58
Figura 19 – Pilar com ferragens expostas (ninhos de concretagem) após a concretagem por conta de falhas no processo de adensamento do concreto.	58
Figura 20 – Exemplo de flexão excessiva em viga.....	59
Figura 21 – Degradação química no concreto por lixiviação	60
Figura 22 – Representação de cilindro de concreto exposto à água do mar	71
Figura 23 – Representação esquemática de afluente e efluente	76
Figura 24 – Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio.....	83
Figura 25 – Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de magnésio	86
Figura 26 – Representação esquemática do ataque de sulfatos.	90
Figura 27 – Mineral etringita. a) encontrado em Ettigen, na Alemanha; b) encontrado em Kuruman.	97
Figura 28 – Morfologia da etringita.....	99
Figura 29 – Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia ou DEF (delayed ettringite formation).	100
Figura 30 – Fatores intervenientes na formação de etringita secundária.....	102
Figura 31 – Concreto sob o ataque de sulfatos com formação da taumasita.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais componentes do cimento Portland.....	28
Tabela 2 – Classes de Agressividade Ambiental	47
Tabela 3 – Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto.....	48
Tabela 4 – Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$.	48
Tabela 5 – Composição da água do mar	70
Tabela 6 – Limites máximos para a expansão devida à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados	74
Tabela 7 – Concentração de sulfato: tabela resumo da concentração em esgotos domésticos	76
Tabela 8 – Faixas de variação das concentrações de sulfato e sulfeto para afluentes e efluentes dos reatores UASB tratando esgotos domésticos	77
Tabela 9 – Principais produtos utilizados no tratamento de água e esgotos.....	78
Tabela 10 – Características dos principais tipos de sais selenitosos	80
Tabela 11 – Exemplos de classificação de agressividade do meio ambiente em função da concentração de íon sulfato presente no solo ou na água adotada por algumas normas.	95
Tabela 12 – Recomendações para incrementar a resistência do concreto ao ataque de sulfatos.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS

C	- CaO - Cal viva
S	- SiO ₂ - Sílica
H	- H ₂ O - Água
A	- Al ₂ O ₃ - Alumina
F	- Fe ₂ O ₃ - Óxido férrico
M	- MgO – Óxido de magnésio - Magnésia
\bar{S}	- SO ₃ - Trióxido de enxofre
CH	- Ca(OH) ₂ - Hidróxido de cálcio - Portlandita
C ₃ S	- 3CaO . SiO ₂ - Silicato tricálcico
C ₂ S	- 2CaO . SiO ₂ - Silicato dicálcico
C ₃ A	- 3 CaO . Al ₂ O ₃ - Aluminato tricálcico
C ₄ AF	- 4 CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃ – Ferro aluminato tetracálcico
C-S-H	- 3CaO . 2SiO ₂ . 3H ₂ O – Silicato de cálcio hidratado
C \bar{S} H ₂	- CaSO ₄ . 2H ₂ O - Gipsita
C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂	- 6CaO . Al ₂ O ₃ . 3CaSO ₄ . 32 H ₂ O – Sulfoaluminato de cálcio - Etringita
C ₄ A \bar{S} H ₁₈	- 4CaO . Al ₂ O ₃ . SO ₄ . 18H ₂ O - Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
CaSiO ₃ .CaCO ₃ .CaSO ₄ .15H ₂ O	- Taumasita
a/c	- água/cimento
CO ₂	- Dióxido de carbono
CO	- Monóxido de carbono
O ₃	- Ozônio
O ₂	- Oxigênio
SO ₂	- Dióxido de enxofre
NO ₂	- Dióxido de nitrogênio
NO	- Monóxido de nitrogênio
CaCO ₃	- Carbonato de cálcio
SO ₄ ²⁻	- Sulfato
CaSO ₄	- Sulfato de cálcio
Na ₂ SO ₄	- Sulfato de sódio
MgSO ₄	- Sulfato de magnésio
K ₂ SO ₄	- Sulfato de potássio
(NH ₄) ₂ SO ₄	- Sulfato de amônio
OH ⁻	- Íon Hidroxila
S ²⁻	- Sulfeto

H_2S	- Gás sulfídrico
H_2SO_4	- Ácido sulfúrico
H_2SO_3	- Ácido sulfuroso
HSO_4^-	- Bissulfato
FeS_2	- Pirita / Marcasita
FeSO_4	- Sulfato ferroso
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	- Sulfato férrico
FeS	- Pirrotita
CuFeS_2	- Calcopirita
Na_2O	- Óxido de sódio
K_2O	- Óxido de potássio
TiO_2	- Óxido de titânio
NH_3	- Amônia
FeCl_3	- Cloreto férrico
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	- Sulfato de alumínio
NaAlO_2	- Aluminato de sódio
NaOH	- Hidróxido de sódio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO.....	19
2.1.1 Fases Constituintes	21
2.1.1.1 Fase Agregado.....	21
2.1.1.2 Pasta Endurecida.....	23
2.1.1.3 Zona de Transição.....	25
2.1.2 Reações De Hidratação Do Cimento Portland	27
2.1.3 Porosidade e Permeabilidade	34
2.2 DEFINIÇÕES.....	36
2.2.1 Desempenho	37
2.2.2 Durabilidade	40
2.2.2.1 Origens e Causas Das Manifestações Patológicas.....	43
2.2.2.2 Grau de Agressividade.....	46
2.2.2.3 Agentes de Deterioração.....	49
2.2.2.4 Principais Manifestações Patológicas no Concreto.....	52
2.2.2.5 Ambientes Agressivos.....	60
2.3 REAÇÕES EXPANSIVAS.....	64
2.4 A AÇÃO DE SULFATOS NO CONCRETO.....	65
2.4.1 Considerações Iniciais	65
2.4.2 Os Sais de Sulfato	67
2.4.2.1 Origem dos Sais.....	67
2.4.2.2 Tipos e Agressividade dos Sais.....	79
2.4.3 O Ataque de Sulfatos	87
2.4.3.1 Natureza do Ataque.....	89
2.4.3.2 Evolução do Ataque.....	92
2.4.3.3 Intensidade do Ataque.....	94
2.4.4 Formação de Etringita	96
2.4.4.1 Mineral Etringita.....	97
2.4.4.2 Etringita Primária.....	98

2.4.4.3 Etringita Secundária (DEF - <i>Delayed Ettringite Formation</i>)	99
2.4.5 Formação de Taumasita.....	103
2.4.6 Variáveis Intervenientes no Processo de Agressão.....	105
2.4.7 Ensaio de Resistência a Sulfatos.....	108
2.4.8 Medidas de Proteção contra Ataque de Sulfatos.....	112
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
REFERÊNCIAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da história da humanidade, o mundo vem passando por modificações, e ao mesmo tempo se ajustando a esta evolução em todas as áreas do conhecimento humano. Com o uso de ferramentas por ele criadas a partir de matérias primas encontradas na natureza, ele aprendeu a empregá-las como recurso de sobrevivência, e assim, satisfazer suas necessidades e desejos.

Com o passar do tempo, à humanidade evoluiu e juntamente com isso a complexidade das suas criações se tornaram algo cada vez maior. As obras de engenharia e a evolução tecnológica, por exemplo, foram transformadas a proporcionar uma melhor servicibilidade aos usuários. Porém, as sociedades modernas passaram a funcionar sob uma grande e dispendiosa infraestrutura. Fatos como a limitação dos recursos naturais por alto consumo e/ou razões ecológicas, a escassez de capital em muitas economias mundiais, a exemplo do Brasil, têm sido os fatores primordiais para a expansão sustentável de muitos países. Dessa forma, o consumo acelerado de materiais e serviços, muitas vezes, não chegam a contento e, os custos posteriores necessários à conclusão dos empreendimentos tornam-se maiores, implicando, muitas vezes, na paralisação definitiva de obras principalmente em países do terceiro mundo.

Logo, em decorrência destes fatos supracitados, a durabilidade e o desempenho dos produtos e sistemas, construídos e em desenvolvimento, tem se tornado questões preocupantes em vários setores da construção civil, o que implica, em estudos e pesquisas mais intensos acerca das manifestações patológicas e da durabilidade das estruturas advindas das paralisações, que fica submetida às edificações e equipamentos urbanos públicos e privados.

Mesmo com estudos, pesquisas e o conseqüente acúmulo de conhecimento, fatores adversos têm sido presenciados nas construções que implicam na perda da durabilidade e qualidade das obras vigentes. Assim, é possível visualizar vários casos de obras recentes cuja sua deterioração ocorreu num tempo menor que o previsto em projeto.

Segundo FILHO (1994), diversas são as causas que podem ser citadas para esta situação, tais como: a dificuldade de produzir ensaios de avaliação da durabilidade confiáveis; as discrepâncias existentes entre o comportamento dos fenômenos de deterioração em laboratório e na estrutura real; a transmissão

deficiente dos conhecimentos para o meio produtivo; o surgimento de novos materiais, ou a modificação dos existentes, como por exemplo nos cimentos com adição; a variação nas condições ambientais ao longo do tempo, como o aumento da poluição nas zonas urbanas de grandes cidades; etc.

Todas essas causas citadas anteriormente são motivos que influenciam para o aparecimento de incertezas no tocante à exposição das estruturas ao meio ambiente, e conseqüentemente, dificultando ainda mais a estimativa de vida útil do empreendimento. Já que, por exemplo, no caso do concreto, quando exposto em determinadas condições, tem sua vida útil comprometida se não forem tomadas as medidas adequadas para prevenir ou reduzir o risco potencial de deterioração, ou seja, é preciso um estudo detalhado das variáveis ambientais mais influentes na degradação e das características dos próprios materiais usados na construção, para que seja determinado o seu desempenho e assim sendo, contornando situações desconfortáveis.

A temática do presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do concreto feito com cimento Portland frente ao ataque de substâncias sulfatadas. Esse material deve desempenhar adequadamente suas funções prescritas em projeto, como também resistir à ação dos agentes agressivos advindos do meio ao qual está inserido.

Um dos pontos a ser discutido é o quesito de durabilidade em serviço, que é justamente determinada pela capacidade da estrutura de resistir a quaisquer processos de deterioração, o que necessita da especificação de materiais a serem usados na sua execução, com características adequadas de maneira a conviver com a agressividade do entorno a que estará sujeito durante a vida útil. Caso isto não ocorra, acontecerá a degradação prematura, principalmente quando os materiais utilizados são inapropriados para garantir o desempenho do concreto exposto a determinados agentes deletérios.

Em relação à deterioração do concreto, ela ocorre na prática por fenômenos físico-químicos, que geralmente tem diversas origens. Dentre os agentes químicos mais agressivos ao material há os sulfatos, dos quais são também conhecidos como óxidos sulfúricos, onde se pode encontrar diluídos na água, tornando-se assim os concretos destinados a obras marítimas, subterrâneas ou de condução de rejeitos industriais e esgotos os mais vulneráveis a esses ataques.

1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com os princípios de durabilidade, recuperação e sustentabilidade nas estruturas, estudar e pesquisar sobre esses temas são de suma importância na contribuição para a Engenharia Diagnóstica, uma vez que este ramo da Engenharia Civil ainda é uma área em desenvolvimento no Brasil.

Sendo assim, a procura pelo reestabelecimento do desempenho da estrutura e do seu bom funcionamento ao invés de uma demolição, é um ponto essencial em um tempo onde a preocupação com o meio ambiente é indispensável.

Segundo CALLEJA (1986), a verificação das experiências coletadas em trabalhos de pesquisa passados e atuais, nos leva a instaurar certo nível de conhecimento, como também, mostrar as falhas neles contidas, fazendo com que desta forma, os casos com problemas não resolvidos sejam visados com mais atenção, destacando assim, o interesse para um melhor entendimento onde muitas vezes, suas soluções, possam servir para certos propósitos tecnológicos.

A partir desta ideia, este trabalho visa propor uma reflexão quanto à durabilidade do concreto, em especial ao ataque químico por sulfatos.

O concreto foi comprovado na prática como um material que oferece a elevada vida útil das estruturas. Entretanto, nos últimos anos, o número de estruturas de concreto que sofreram ou ainda sofrem com o processo de deterioração precoce é muito elevado, e esta realidade na área da Patologia das Estruturas, se faz necessária para um maior estudo e investigações de prevenção e controle das ações deletérias ao concreto, como também, para recuperação e reabilitação das estruturas com problemas já existentes.

Em todo o mundo o concreto é utilizado em edificações e em obras diversas de engenharia. A construção de uma estrutura de concreto em vários locais, com diferentes tipos de solos, de temperatura, de umidade, de presença de água e também agentes degradantes, são fatores de suma importância para a determinação da durabilidade e vida útil das estruturas.

A deterioração do concreto se dá essencialmente por efeitos físico-químicos. São diversos os mecanismos de degradação atuantes, dentre eles temos, as reações álcali-agregado (RAA), o ataque por ação dos cloretos, por ação de ácidos e sais, por ação do anidrido carbônico, conhecida esta última como carbonatação, e também, o ataque por ação de sulfatos, que será objeto de estudo deste trabalho.

As estruturas de concreto padecem muito com as águas ricas em sulfatos, principalmente em solos onde as fundações da obra estão em contato permanente.

Um dos pontos que motivaram a escolha da temática do presente trabalho foi com relação ao impacto econômico, já que os custos financeiros para recuperação de estruturas enterradas, normalmente demandam valores mais elevados do que em estruturas aéreas. Este trabalho procura analisar as melhores formas de se evitar ou minimizar os ataques de sulfatos nas estruturas.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

- Caracterização do ataque ao concreto, influência na durabilidade, focalizando os efeitos da agressão química provocada por íons sulfatos.

Objetivos Específicos

- Analisar onde ocorrem as maiores incidências (qual meio que ocorrem);
- Descrever o mecanismo de ataque dos sulfatos ao concreto;
- Discutir sobre quais os sulfatos mais agressivos ao concreto armado;
- Mostrar como ocorre a formação de Gesso, Etringita e Taumasita;
- Quais as medidas de prevenção ao ataque;
- Processos de atenuação dos efeitos do ataque.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

Para o desenvolvimento do presente trabalho, faz-se necessário o estudo do concreto enfocando sua estrutura tanto macroscópica como microscópica, propriedades e suas características. Esta caracterização tem grande importância para o entendimento, propagação e medidas mitigadoras ao ataque de íons sulfatos ao concreto.

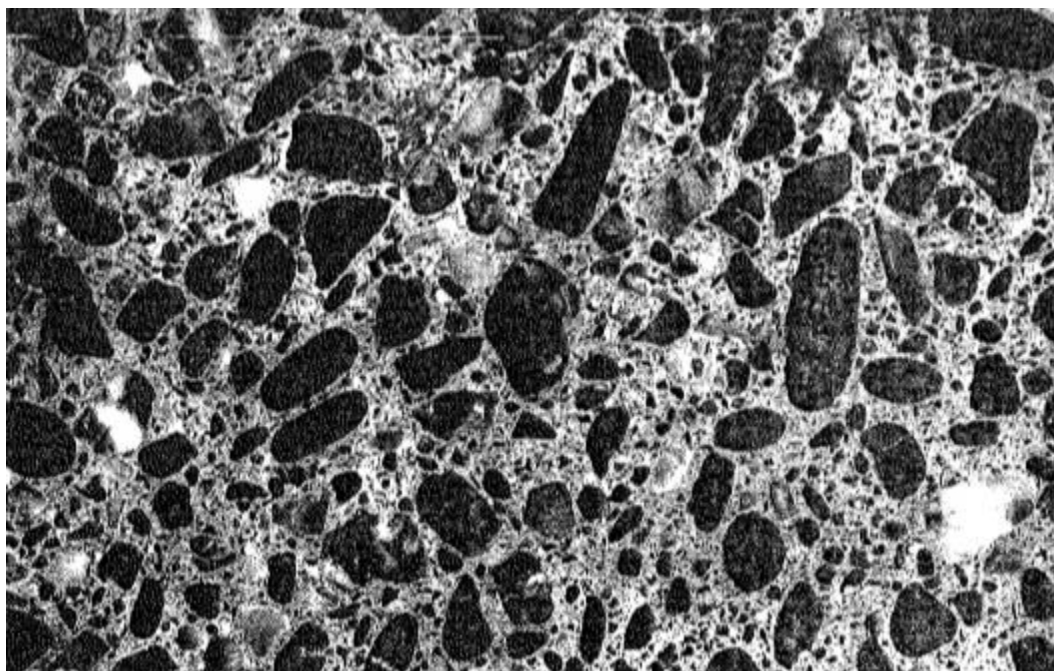
De acordo com ARAÚJO, RODRIGUES E FREITAS (2000), o concreto é definido como o material formado pela mistura de agregado graúdo, agregado miúdo, aglomerante, água e, se preciso, aditivos, com todos eles seguindo uma pré-determinada proporção.

Para MEHTA E MONTEIRO (2008), o concreto é um material compósito ao qual é formado principalmente de um meio aglomerante, que é a mistura de cimento hidráulico e água, e adicionado com partículas ou fragmentos de agregado. O cimento Portland é o aglomerante mais usado para a fabricação do concreto. Ele também é um material finamente pulverizado e adquire propriedades ligantes apenas quando hidratado, uma vez que ocorrem reações químicas entre os minerais do cimento e a água. As partículas de agregado graúdo são facilmente vistas no concreto, no entanto os elementos que formam a pasta de cimento só podem ser visualizados por intermédio de um microscópio.

Em concordância com os autores acima citados, por meio de uma investigação de uma seção transversal do concreto, ilustrado na Figura 1, as duas fases que podem ser facilmente distinguidas são as partículas de agregado com formas e tamanhos variados e o meio ligante composto de uma massa de pasta de cimento hidratada. No nível macroscópico, o concreto pode ser considerado como um material bifásico, constituído de partículas de agregado dispersas em uma matriz de pasta de cimento. Já no nível microscópico, as complexidades da microestrutura de concreto são evidentes. Notando-se que as duas fases da microestrutura não são distribuídas de forma homogênea entre elas, nem elas são homogêneas entre si, tendo-se como exemplo, em algumas regiões, a massa da pasta de cimento hidratada aparenta ser tão densa quanto o agregado, enquanto em outras ela é altamente

porosa. Sendo possível notar também no nível microscópio uma terceira fase, que é justamente a região interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta endurecida, conhecida como zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 1: Secção polida de um corpo-de-prova de concreto.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008.

De acordo com PAULON (2005), como o concreto adquire a forma de um conglomerado, formado por agregados de diversas dimensões envolvidos por uma pasta de cimento, torna-se possível compará-lo a uma rocha artificial. Esta pasta possui uma heterogeneidade, caracterizada pela presença de partículas, filmes, microcristais e elementos sólidos, ligados por uma massa porosa que contém vazios (poros) e espaços com soluções.

Ainda segundo PAULON (2005), é possível complementar os conceitos citados verificando que, quando é abordado que as propriedades mecânicas, físicas, elásticas e químicas do concreto são dependentes de vários fatores relativos à pasta, aos agregados e como também à ligação entre eles, podendo-se destacar então que todas as fases são fundamentais na contribuição das propriedades finais do concreto.

Para SOUZA E RIPPER (1998), a análise da durabilidade como função da resistência mecânica, da estabilidade dimensional e da resistência química do

concreto, implica perfeito conhecimento destas suas características, que, por sua vez, são grandemente dependentes das características de seu principal componente, o cimento.

Já no relevante a estabilidade dimensional do concreto, ou seja, os fenômenos de expansão, retração e fissuração, e a resistência química do concreto, isto é, sua capacidade de resistir aos diversos agentes químicos (água do mar, salinidade do ar, poluição atmosférica, etc.), está intimamente ligada às características físicas e químicas do cimento, tais como finura, expansibilidade, composição potencial, presença de cal livre, de óxido de magnésio, etc., e não à sua resistência mecânica.

2.1.1 Fases constituintes

2.1.1.1 Fase Agregado

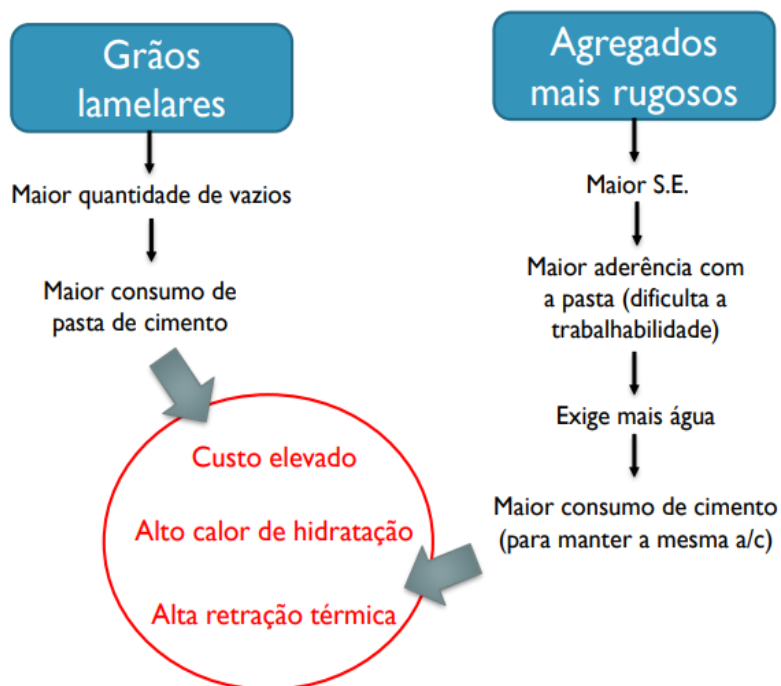
São estabelecidas de acordo com a NBR 7211 (2009) algumas condições para os agregados utilizados no concreto, entre os quais devem ser constituídos por grãos de minerais duros, estáveis, compactos, duráveis e limpos. Como também, a norma tem um parâmetro para delimitar e separar o que é considerado agregado graúdo e miúdo, e para isso é determinado à peneira #4 (4,75mm) como sendo o separador entre esses dois tipos de agregados, fazendo com que a parte passante seja definida como agregado miúdo e a parte retida como agregado graúdo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009).

A fase agregado chega a ocupar cerca de 60 a 80% do volume de concreto e se torna a responsável pelas seguintes propriedades: módulo de elasticidade, massa unitária e estabilidade dimensional do concreto. É considerado ainda, que as características físicas, tais como: forma, volume, textura, tamanho e distribuição de poros, podem ser mais importantes que a composição mineralógica ou química (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com SOUZA E RIPPER (1998), seja do ponto de vista econômico ou do ponto de vista técnico, os agregados utilizados no concreto exercem influência sobre algumas características importantes, tais como a redução da retração, o aumento da resistência aos esforços mecânicos entre outros.

NEVILLE (1997) afirma que o agregado tem influência não apenas na resistência, mas também no desempenho estrutural e na durabilidade do concreto. Para isso é necessário considerar o agregado como um material não inerte e que possui propriedades físicas, químicas e térmicas que apresentam certa influência no desempenho final do concreto. É decorrente disto, só devem ser utilizados quando isentos de substâncias nocivas (torrões de argila, matérias contendo carbono, material pulverulento e impurezas orgânicas), tendo grãos resistentes e de preferência arredondados e não muito rugosos, uma vez que a forma e a rugosidade dos grãos facilitam o adensamento do concreto como também sua trabalhabilidade. A seguir é exibido a Figura 2 com o resumo das consequências em relação a rugosidade e ao formato dos grãos, que caso apresentem formato lamelar e com uma maior rugosidade, podem gerar no final um custo elevado do concreto, como também um maior calor de hidratação e uma alta retração térmica, tudo isso devido ao maior consumo da pasta de cimento.

Figura 2: Consequências em relação a rugosidade e ao formato dos grãos. Onde, S.E.: Superfície Específica.



Fonte: CUSTÓDIO, 2011. Disponível em:

<<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17310/material/05%20-%20Estrutura%20Interna%20do%20Concreto.pdf>> (acesso em 05/08/2019).

Segundo MEHTA E MONTEIRO (2008), a influência do agregado sobre a resistência do concreto costuma ser negligenciada, uma vez que, a resistência do agregado normalmente não é um fator determinante na resistência do concreto porque, com exceção dos agregados leves, a partícula de agregado é muito mais resistente do que a matriz e a zona de transição na interface no concreto.

Outros fatores que interferem nas características do concreto, e dentre eles; o teor de umidade dos agregados, uma vez que, a quantidade de água conduzida ao concreto por eles altera consideravelmente o fator água/cimento. Outro fator seria a composição granulométrica que tem grande influência sobre a qualidade do concreto, principalmente sobre a compactidade e a resistência aos esforços mecânicos. Sendo também a granulometria fator de grande importância na definição da trabalhabilidade e da uniformidade do concreto, sendo a graduação adequada um fator de redução da quantidade de pasta de cimento de que se necessita empregar para produzir um concreto de boa qualidade (SOUZA; RIPPER, 1998).

2.1.1.2 Pasta endurecida

A pasta endurecida tem aparência homogênea a olho nu, porém na verdade ela apresenta uma estrutura heterogênea, formada por três fases: sólidos, vazios e água, como afirma MEHTA E MONTEIRO (2008).

É definido segundo esses autores que os sólidos na pasta de cimento são os produtos das reações de hidratação, tais como:

- Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H): fase em que compõe de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada, sendo portanto, a fase mais importante, determinando as propriedades da pasta;
- Hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 : Cristais de hidróxido de cálcio (também chamados portlandita) constituem cerca de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada;
- Sulfoaluminatos de cálcio (etringita): ocupam cerca de 15 a 20% do volume da pasta de cimento hidratada e possuem, portanto, apenas um papel secundário nas relações microestrutura-propriedade;

- Grãos de clínquer não hidratados: dependendo da distribuição do tamanho das partículas do cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas, mesmo muito tempo depois da hidratação.

Além dos sólidos, a pasta de cimento hidratada contém muitos tipos de vazio que têm uma influência importante em suas propriedades. E a divisão dos vazios segundo MEHTA E MONTEIRO (2008) estão assim descritos:

- Espaços interlamelares no C-S-H: A largura do espaço interlamelar na estrutura C-S-H é de 18Å. Esse tamanho são poros muito pequenos, irrelevantes na permeabilidade e na resistência, mas importantes na retração por secagem e fluência;
- Vazios capilares: correspondem ao espaço não preenchido pelos componentes sólidos da pasta de cimento hidratada, possuindo um formato irregular, e resultando na porosidade do material. Os vazios capilares na literatura moderna tem o valor 50 nm que separa micro e macroporos, sendo microporos os vazios menores que 50 nm (importantes para a retração por secagem e a fluência) e macroporos os vazios maiores que 50 nm (prejudiciais à resistência e à impermeabilidade);
- Ar incorporado: no ar incorporado as bolhas variam de 50 a 200 μm favorecendo a trabalhabilidade já no ar aprisionado as bolhas são de até 3 mm, aprisionadas durante a mistura na betoneira. Como seus tamanhos são muito maiores de que os vazios capilares, afetam assim negativamente na resistência.

Da mesma forma que as fases do sólido e dos poros, já discutidas, a água na pasta de cimento hidratada pode existir de várias formas. Sua classificação é baseada no grau de dificuldade ou facilidade com que pode ser removida da pasta. Conforme MEHTA E MONTEIRO (2008) a água nos poros pode ser:

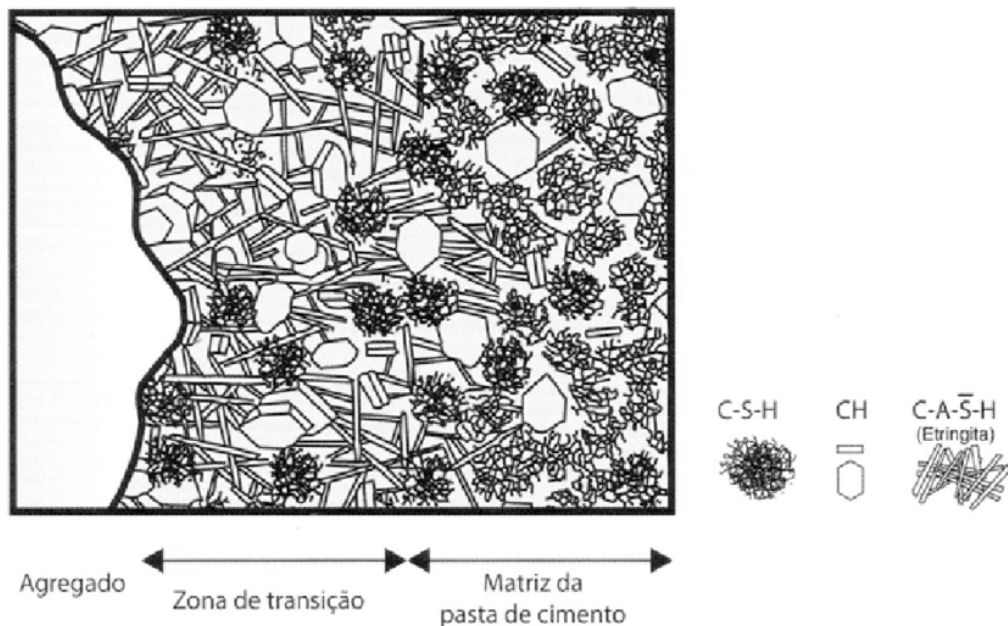
- Água capilar: é aquele presente nos vazios maiores que 50 Å, podendo ser descrita como o volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida;

- Água adsorvida: é aquela que se encontra próxima à superfície do sólido, e a sua perda é a principal responsável pela retração da pasta de cimento hidratada;
- Água interlamelar: é fixada com a estrutura do C-S-H por pontes de hidrogênio, e somente é perdida por uma forte secagem (abaixo de 11% de umidade relativa);
- Água quimicamente combinada: é aquela que integra parte da microestrutura de vários produtos hidratados do cimento; ela é removida apenas com elevadas temperaturas.

2.1.1.3 Zona de Transição

Segundo PAULON (2005), a zona de transição é definida como a região de maior porosidade, por causa da formação de cristais de grandes dimensões, como pode ser visto na Figura 3 abaixo:

Figura 3 - Distribuição dos cristais de hidróxido de Cálcio, Silicato de Cálcio Hidratado e de Etringita, na zona de transição até a pasta propriamente dita.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008.

MEHTA E MONTEIRO (2008), chamam a zona de transição como “o elo mais fraco da corrente”, uma vez que eles descrevem como característica dessa região a baixa resistência, principalmente quando comparada à resistência do agregado e da pasta de cimento, sendo representado então como o ponto de ruptura da estrutura. Ele ainda continua afirmando que embora a zona de transição sendo composta pelos mesmos elementos que a pasta de cimento hidratada, a microestrutura e as propriedades da zona de transição na interface são diferentes da matriz da pasta. É dessa maneira que podemos tratar a zona de transição como sendo outra fase isolada da microestrutura do concreto.

Para PAULON (2005), a pasta de cimento e a zona de transição podem ser diferenciadas no relevante ao comportamento do material em cada direção. Uma vez que a pasta de cimento tem a possibilidade de ser considerado um meio isotrópico (mesmas propriedades em todas as direções), a zona de transição já é o oposto, sendo fortemente anisotrópica (propriedades diferentes em direções diferentes). Na zona de transição é formado cristais lamelares que provocam uma orientação preferencial em relação à superfície do agregado, permitindo assim a propagação intercrystalina das fissuras. Portanto, é formada uma concentração de tensões toda vez que o concreto for submetido a ações mecânicas, fragilizando assim a região.

Para METHA E MONTEIRO (2008) a microestrutura da zona de transição desempenha uma grande influência na rigidez ou no módulo de elasticidade do concreto. Eles também citam que existem alguns fatores que são responsáveis pela baixa resistência da zona de transição, como por exemplo: o grande volume e tamanho de vazios capilares e cristais de hidróxido de cálcio orientados e a presença de microfissuras.

PAULON (2005) cita que em relação as três propriedades fundamentais do concreto: durabilidade, porosidade e a resistência mecânica, a ligação que há entre o agregado e a pasta de cimento não é resultado apenas em um entrelaçamento mecânico dos produtos de hidratação do cimento, como também da reação química que há entre agregado e a pasta de cimento.

2.1.2 Reações De Hidratação Do Cimento Portland

Antes de falar sobre como ocorre as reações de hidratação do cimento Portland, é necessário primeiramente conhecer os componentes essenciais desse composto. BAUER (1994), cita que os componentes que fazem parte são a cal (CaO), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃), constituindo de 95 a 96% do total de óxidos. Mas também existem outros componentes presentes, porém em quantidades menores, tais como, magnésia (MgO), anidro sulfúrico (SO₃), óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂), entre outros.

No processo de fabricação, segundo SOUZA E RIPPER (1998), os cimentos tipo Portland são obtidos através da calcinação, a altas temperaturas, chegando próximas aos 1500°C, por meio da moagem do clínquer (mistura de minerais) com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio (CaSO₄). Essa mistura é composta por calcário (carbonato de cálcio) e argilas (silicatos de alumínio e ferro), assim como de uma certa quantidade de gipsita [CaSO₄.2H₂O] (gesso com grau de finura elevado), material controlador de pega (que atua como redutor da velocidade de hidratação), e, eventualmente, de substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro. Resultando no final na formação de compostos silicatos e aluminatos. Sendo então formado o cimento anidro, que é um pó cinza composto de partículas angulares com dimensões que variam entre 1 a 50µm. No Tabela 1, os compostos silicatos e aluminatos formados são:

Tabela 1: Principais componentes do cimento Portland

Componente	Nome	Propriedades
C ₃ S 3CaO.SiO ₂	Silicato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Principal responsável pela resistência a curto prazo, principalmente ao fim do primeiro mês de cura. 2. Segundo componente mais importante na produção do calor de hidratação. 3. Segundo componente responsável pelo tempo de pega. 4. Sua forma impura é também conhecida como Alita. 5. Sua velocidade de hidratação é controlada pela velocidade de difusão dos íons por camadas sobrejacentes do produto hidratado.
C ₂ S 2CaO.SiO ₂	Silicato Dicálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresenta-se sob 3 formas diferentes: <ul style="list-style-type: none"> - Em temperaturas elevadas - α-C₂S - Em temperaturas por volta de 1450°C - β-C₂S (presente nos cimentos comerciais) - Em temperaturas por volta de 670°C - γ-C₂S 2. Principal responsável pela resistência a longo prazo. 3. Sua forma impura é também conhecida como Belita. 4. Sua hidratação é controlada pela sua baixa velocidade intrínseca de reação.
C ₃ A 3CaO.Al ₂ O ₃	Aluminato Tricálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Forma partículas cristalinas retangulares. 2. Principal componente na produção do calor de hidratação. 3. Principal componente pela rapidez da pega, quando presente na forma cristalina. 4. Sua forma predominante é a de placas achatadas. 5. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.
C ₄ AF 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ferro Aluminato Tetracálcico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apresenta-se sob a forma de solução sólida. 2. Atua como fundente na fabricação do cimento Portland.

Fonte: COSTA, 2004.

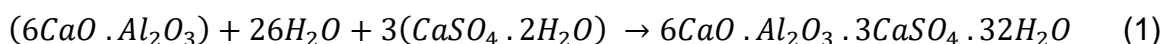
SOUZA E RIPPER (1998), diz que essas matérias primas, sob tão elevada temperatura, reagem entre si, e os produtos da reação, ao serem resfriados, aglomeram-se em pedaços de dimensões variáveis, geralmente entre 2mm e 20mm, aglomeração que se chama clínquer. A moagem do clínquer Portland dá origem ao cimento Portland.

A composição potencial do cimento é obtida a partir de sua análise química, isto é, da determinação das quantidades relativas dos silicatos e dos aluminatos que se formaram durante a produção do clínquer, sendo as suas proporções o fator determinante de várias das propriedades do cimento, como, por exemplo, a resistência à compressão, calor de hidratação, resistência química, permeabilidade, porosidade, etc.

É conhecido, de acordo com MEHTA E MONTEIRO (2008), que os aluminatos se hidratam a uma velocidade bem mais rápida que os silicatos. Como a reação com o C₃A é instantânea, ou seja, com uma velocidade muito rápida, seria inviável a sua

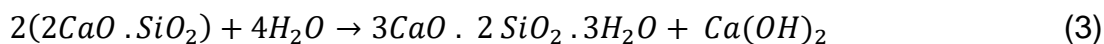
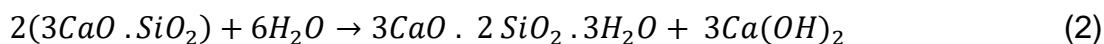
utilização na construção civil, é então que vem a atuação da gipsita no composto, para que seja possível a sua aplicabilidade com um tempo de pega maior.

É relatado ainda pelos autores sobre o processo de hidratação do cimento: a partir do momento em que o cimento é disperso em água, o sulfato de cálcio e os compostos de cálcio formados a altas temperaturas tendem a formar uma solução, e a fase líquida se torna rapidamente saturada com várias espécies de íons, que dentre eles estão os álcalis solúveis (Ca^{2+} , SO_4^{2-} , OH^-), resultando então em um pH elevado, entre 12 e 13. Dentro de poucos minutos da hidratação do cimento, começam a aparecer cristais aciculares (formato de agulha) de trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também conhecida como etringita ($\text{C}_6\text{A}\overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$), com liberação de grande quantidade de calor de hidratação. A reação do C_3A com água são representadas pela EQUAÇÃO (1).



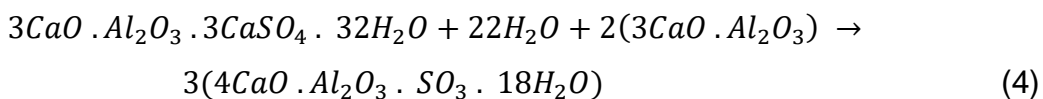
METHA E MONTEIRO (2008) citam que os produtos decorrentes da hidratação do ferroaluminato de cálcio na presença de sulfato são parecidos àqueles formados pela hidratação do C_3A , porém podendo variar de acordo com a concentração de sulfato e produzir $\text{C}_6\text{A}(\text{F})\overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ou $\text{C}_4\text{A}(\text{F})\overline{\text{S}}\text{H}_{18}$.

Ainda e de acordo com METHA E MONTEIRO (2008), poucas horas mais tarde, grandes cristais prismáticos de hidróxido de cálcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] e pequenos cristais fibrilares de silicatos de cálcio hidratado (C_3S e C_2S) começam a preencher os espaços vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução, conforme EQUAÇÕES (2) e (3):



Ainda segundo esses autores, após alguns dias, dependendo da relação alumina-sulfato do cimento Portland, e quando todo o sulfato tiver sido consumido, a etringita pode se tornar instável e se decompor para formar o monossulfoaluminato de cálcio hidratado ($\text{C}_4\text{A}\overline{\text{S}}\text{H}_{18}$), se tornando assim o produto final da hidratação do

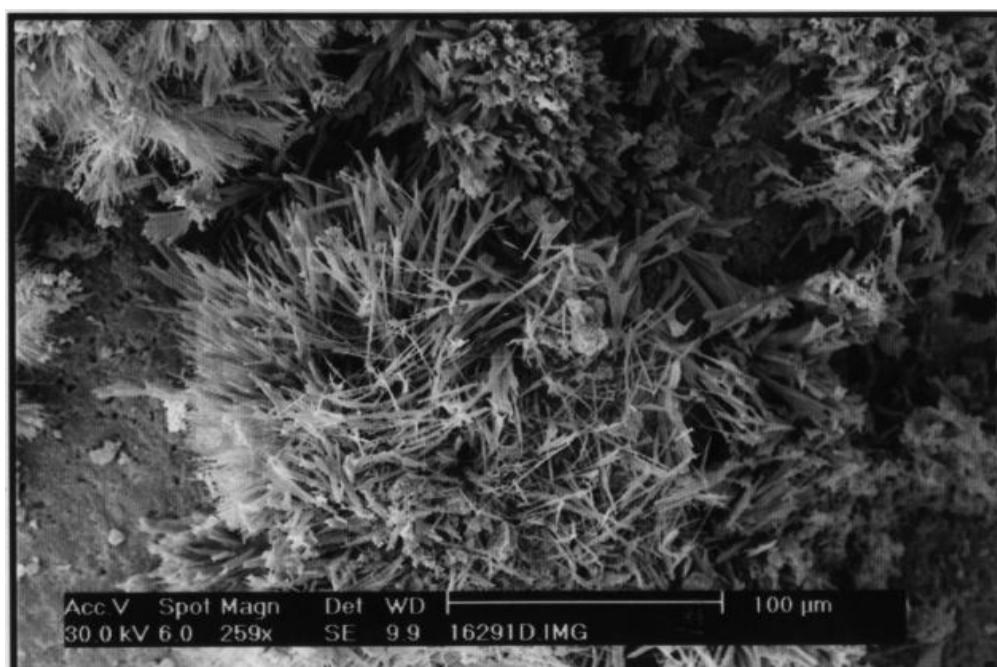
cimento, tendo a forma de placas hexagonais. A morfologia de placa hexagonal também é uma característica dos aluminatos de cálcio hidratados que são formados em pastas de cimento Portland hidratadas contendo baixo teor de sulfato ou alto teor de C_3A . A EQUAÇÃO (4) mostra como ocorre essa reação:



MEHTA E MONTEIRO (2008) mencionam os principais produtos sólidos da pasta das reações de hidratação do cimento:

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): São estruturas pequenas e fibrilares que compõe de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente hidratada, sendo dessa forma, a fase mais importante, e determinando assim as propriedades da pasta. Sua morfologia varia desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares, como é mostrado na Figura 4. A ótima resistência química e mecânica é advinda principalmente às forças de *VAN DER WAALS*. As EQUAÇÕES (2) e (3) mostram como são formadas estas estruturas.

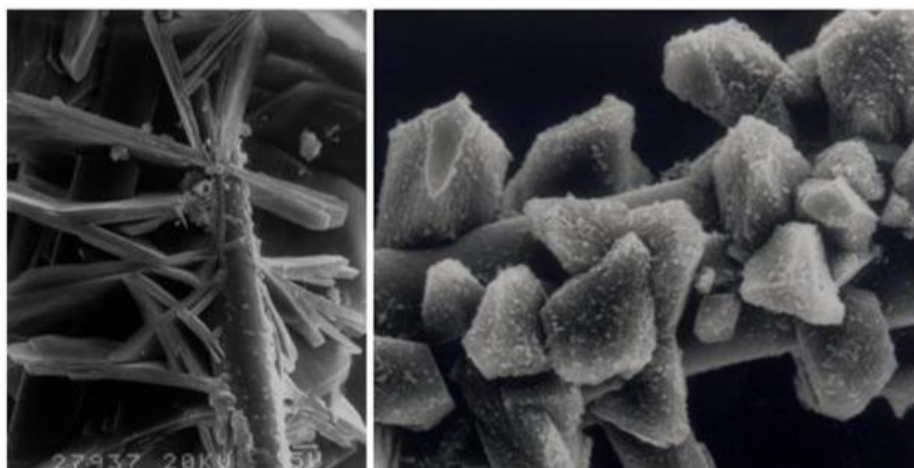
Figura 4: Cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H)



Disponível em: <http://www.ipc.org.es> (acesso em 04/08/2019).

- Hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$: Os cristais de hidróxido de cálcio, que também chamados de portlandita, constituem cerca de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta. Ele possui uma estequiometria definida, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tendendo assim a formar cristais grandes com uma morfologia prismática hexagonal distinta. Sua morfologia geralmente varia de indefinível a amontoados de grandes placas e é afetada pela disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. Comparando-se ao C-S-H, o hidróxido de cálcio tem a potencial contribuição à resistência limitada, uma vez que sua área superficial é consideravelmente mais baixa. Estas estruturas são formadas de acordo com as EQUAÇÕES (2) e (3), e podem ser vistas na Figura 5.

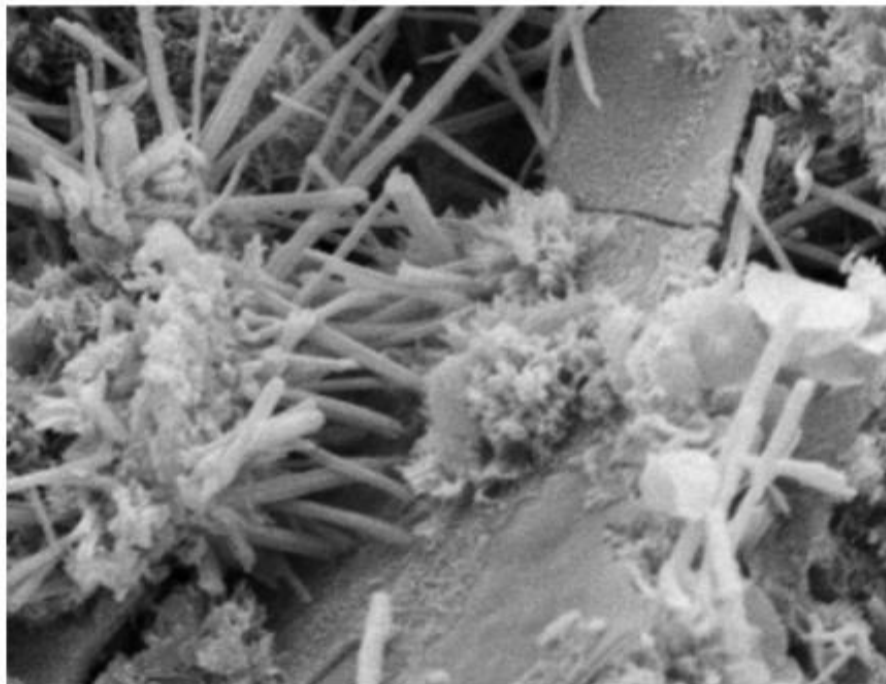
Figura 5: Placas hexagonais de hidróxido de cálcio.



Fonte: ALIZADEH, 2019.

- Sulfoaluminato de cálcio: O volume sólido ocupado pelos sulfoaluminatos de cálcio na pasta de cimento hidratada é cerca de 15 a 20%, possuindo desta forma, apenas um papel secundário na relação, microestrutura-propriedade. Se estabeleceu que, durante os primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina favorece a formação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado ($\text{C}_6\text{A}\overline{\text{S}}_3\text{H}_{32}$), também chamada de etringita, que tem a forma de cristais prismáticos aciculares (formato de agulha), conforme Figura 6. A EQUAÇÃO (1) mostra como são formadas estas estruturas.

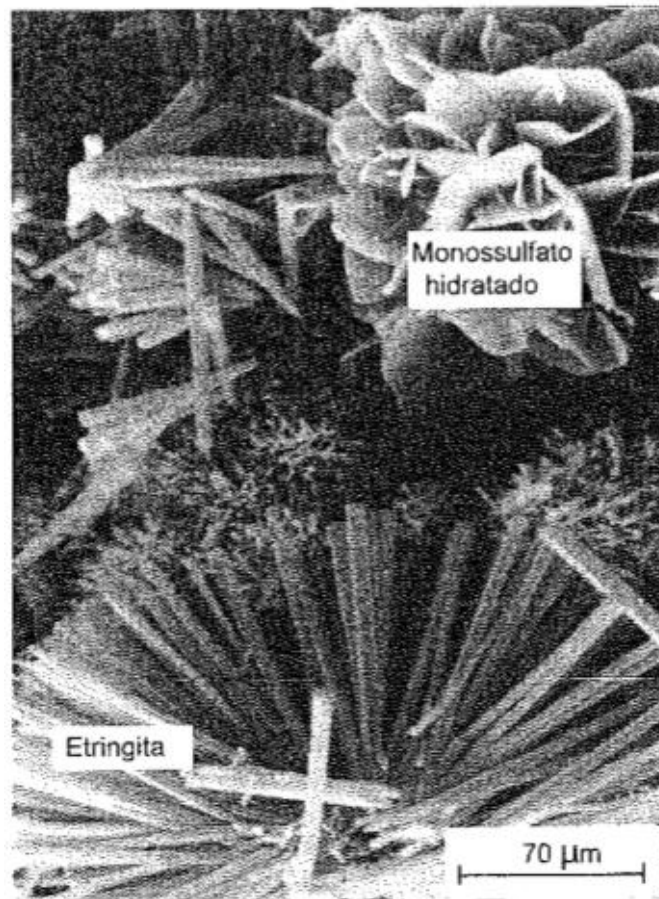
Figura 6: Etringita com seu formato de agulhas



Fonte: ALIZADEH, 2019.

- Nas pastas de cimento puro, eventualmente a etringita se transforma em monossulfato hidratado, $(C_4A\bar{S}H_{18})$, formando-se cristais de placas hexagonais, como pode ser visto na Figura 7. Entretanto, esse monossulfato hidratado no concreto de cimento Portland deixa o concreto vulnerável ao ataque por sulfato. Estas estruturas são formadas de acordo com a EQUAÇÃO (4).

Figura 7: Microestrutura do concreto: monossulfato e etringita



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008.

- Grãos de clínquer não hidratado: Dependendo da distribuição do tamanho das partículas do cimento anidro e do grau de hidratação, alguns grãos de clínquer não hidratados podem ser encontrados na microestrutura das pastas de cimento hidratadas, até depois de muito tempo de ocorrido a hidratação. Com o progresso do processo de hidratação, as partículas menores se dissolvem primeiro e com isso elas desaparecem do sistema, e a partir daí as partículas maiores se tornam menores. Em idades avançadas, devido à falta de espaço disponível, a hidratação in situ das partículas de cimento resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, de morfologia parecida com a partícula do clínquer original.

2.1.3 Porosidade e Permeabilidade

O concreto é um material poroso e praticamente todos os processos e mecanismos que provocam a sua deterioração estão relacionados com a facilidade com que a água (pura ou contaminada) se move através deste material.

O concreto tem sua porosidade (volume, dimensão e interconectividade entre seus poros) regida por características intrínsecas aos seus materiais e a sua dosagem. De acordo com SOUZA E RIPPER (1998), a água em sua forma líquida ou na forma de umidade, é o elemento fundamental no quesito de durabilidade das estruturas de concreto armado. Assim, o fator a/c , que é quantidade de água relacionada com a quantidade de cimento, será primordial para se definir as características do concreto, tais como: densidade, porosidade, compacidade, permeabilidade, capilaridade e resistência mecânica.

A distinção entre os conceitos de porosidade e permeabilidade é abordada por NEVILLE (1997), onde explana que a porosidade é a medida da proporção do volume total de concreto ocupada por poros, normalmente expressa em porcentagem. Sendo que esses poros podem ou não estarem interligados, de maneira que se estiverem, a permeabilidade será maior, e caso não estejam interligados, a permeabilidade será mais baixa, até mesmo se a porosidade for alta.

A permeabilidade é descrita por MEHTA E MONTERIO (2008), como a taxa de fluxo de um fluido através de um sólido poroso, ou seja, a facilidade com que um fluido escoar através de um sólido. Quando já se tem a pasta endurecida, o tamanho e a continuidade dos poros controlam o coeficiente de permeabilidade.

Segundo NEVILLE (1997), quando se aborda sobre o assunto de transporte de fluidos no concreto, consta-se que há três principais fluidos: a água pura ou com íons agressivos, o oxigênio (O_2) e o dióxido de carbono (CO_2).

Já as principais formas de transporte de massa pelo concreto são: difusão, permeabilidade e absorção por sucção capilar, podendo estes ocorrerem de forma de forma conjunta ou separadamente. A difusão transporta o fluido por diferença de concentração do íon, ou seja, da região de maior concentração para a região de menor concentração. A permeabilidade ou também chamada de escoamento, é o movimento que ocorre devido ao diferencial de pressão.

Enquanto o processo de absorção por sucção capilar ocorre por meio do movimento capilar que há nos poros abertos ao meio ambiente, ou seja, temos o mecanismo de transporte de água na fase líquida, e que é definida como fluxo vertical de água, originada do solo, que ascende para uma estrutura permeável, que possui poros. Essa sucção capilar ocorre em concretos parcialmente secos, já que ele não sucede em concretos completamente secos ou saturados.

A Figura 8 retrata as condições de exposição e os mecanismos de transportes de fluidos atuantes numa estrutura.

Figura 8: Diagrama esquemático de uma estrutura marinha mostrando os processos ou mecanismos de transporte atuantes.



Fonte: CLARKE, 1986.

É citado ainda por ARAÚJO, RODRIGUES E FREITAS (2000) que os dois fatores principais aos qual a porosidade depende são: relação a/c e o grau de hidratação da pasta. Em relação ao primeiro, temos que a estrutura da pasta é determinada pela relação água/cimento, pois quanto menor for esta relação, mais

próximos estarão os grãos de cimento e conseqüentemente menor será a porosidade da pasta.

Já o segundo fator considerado é a expansibilidade das reações de hidratação, onde os produtos formados ocupam um volume maior do que o cimento ocupava no início, acarretando assim uma diminuição da porosidade à medida que a hidratação evolui. Pode-se constatar que a porosidade do concreto é reduzida com uma menor relação a/c e com a evolução da hidratação, que é justamente a idade do concreto.

Para KOHLS et al. (2017), a água presente no concreto fresco tem a função de hidratar o cimento para desenvolver suas características de resistência, porém a água em demasia será evaporada, e o seu percurso em direção a superfície do concreto cria redes de poros que trarão fragilidade ao concreto no estado endurecido. Depois que há o processo de hidratação, a estrutura de concreto fica em contato com a água em forma de intempéries nas fachadas ou também com os lençóis freáticos no solo para os casos de fundações. Neste último caso citado, o mecanismo de absorção por capilaridade tem grande valia. Pois neste processo ocorre a ascensão da água, contra a gravidade, através dos poros do concreto.

A presença da água, mesmo pura é um problema principalmente para as armaduras contidas no concreto, se houver oxigênio e a despassivação do aço a presença da água permite a corrosão das armaduras. A água também pode carregar agentes agressivos ao concreto ou ao aço. Por exemplo, águas com sulfatos provocam no concreto uma reação expansiva que pode originar fissuras e lascamento que aceleram o processo de deterioração, águas salinas (cloreto de sódio) promovem a despassivação das armaduras desencadeando o processo de corrosão (KOHLS et al., 2017).

2.2 DEFINIÇÕES

De acordo com SOUZA E RIPPER (1998), a Patologia das Estruturas pode ser entendida pelo estudo das origens, formas de manifestação, conseqüências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Desta forma é necessária a aplicação de um vasto conhecimento teórico e prático no estudo deste setor da engenharia, haja vista que sua análise abrange a ciência acerca

de matérias distintas, como mecânica, materiais e resistência dos materiais, e que modelos resolutivos, normas e códigos são, geralmente, inexistentes, insatisfatórios ou recentes, como o Code Requirements for Evaluation, Repair and Rehabilitation of Concrete Buildings (ACI 562-13) de 2013.

Este foi criado com o objetivo de normatizar procedimentos de análise de resistência do material no local, de análise estrutural, de concepção de reparos visando à resistência e durabilidade do sistema, de estabilidade e escoramento da edificação, de inspeção e testes de reparos nos Estados Unidos, portanto, um código que norteia documentos para reparo em estruturas de concreto.

É entendido ainda pelos autores que esta disciplina não se atém apenas à identificação e conhecimento das anomalias encontradas, porém há um envolvimento de todo um estudo da concepção, do projeto e, acrescenta-se, da execução da recuperação e/ou reforço dos elementos afetados. Neste âmbito, pode-se classificar o estudo dos problemas patológicos em simples – aquele cuja análise se apresenta evidente – ou complexo – que determina uma análise particular e mais detalhada; àquela classificação, não há exigência de competência profissional para ser realizada, já a esta, apresenta-se a necessidade do conhecimento adequado em Patologia Estrutural.

Segundo MATTOS (2015), são destacados ainda que as indagações fundamentais no estudo patológico acerca da estrutura pronta sobre a desenvoltura, manutenção e validade do produto, tem sido levantado, pelos profissionais da área e também por leigos, que, em geral, são os usuários do objeto questionado, isso devido ao crescimento das exigências destes indivíduos envolvidos no assunto. Nesse contexto, os responsáveis pela obra devem seguramente considerar alguns conceitos que comprovem o sucesso da sua invenção, de modo a agregar valor a ele, bem como segurança e servicibilidade aos usuários. Alguns desses termos são discutidos a seguir.

2.2.1 Desempenho

Atualmente nas estruturas civis é evidente a necessidade da existência dos fatores qualitativos de solidez, servicibilidade e funcionalidade. A atuação deles em conjunto pode-se denominar de desempenho.

De acordo com MATTOS (2015) esses três aspectos constituintes do conceito em questão precisam ser considerados como propriedades essenciais do produto, resultando em um sistema de qualidade, pode-se alegar que o desenvolvimento do desempenho de uma estrutura nasce com a edificação na etapa de concepção e projetos, sucedendo por todas as fases seguintes, na maneira que cada uma delas tem a sua importância no resultado do comportamento da edificação em serviço.

Os gerentes de projeto e execução mostram-se como elementos técnicos de grande valia para este fim, uma vez que eles se tornam responsáveis, respectivamente, pela criação de um sistema inteligente do relevante da estabilidade, de serviço e funcional, bem como, pelo implemento conforme ideia elaborada, asseverando assim, um produto eficiente e seguro, conseqüentemente de desempenho satisfatório. Assim sendo, a etapa de uso e manutenção é apontada como a responsável pela conservação do desempenho esperado, haja vista a realização das devidas práticas a ela pertencente. Vale salientar que este aspecto, em certa estrutura, será adequado quando o sistema atender com eficiência e segurança aos seus usuários no decorrer de um determinado período de tempo, ao qual chamamos de vida útil.

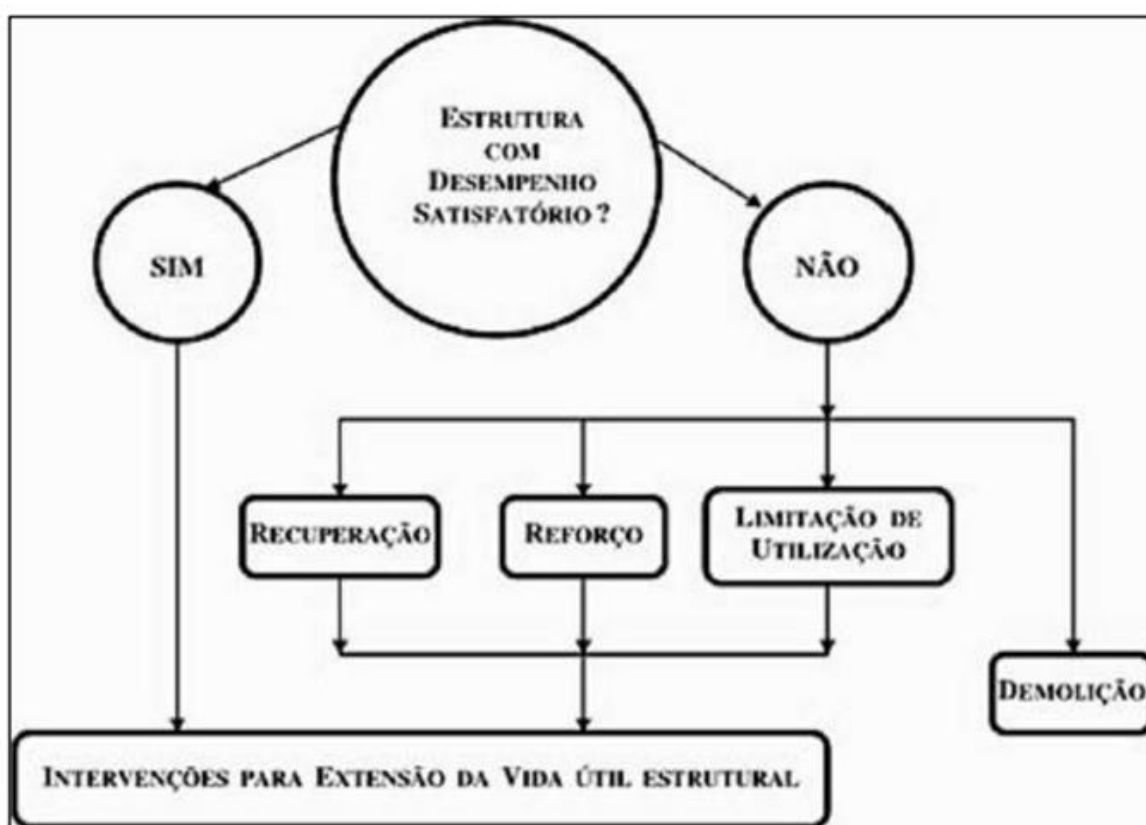
Quando se fala em estruturas de concreto armado, REZENDE et al. (1996) aponta que haverá o desempenho apropriado quando existir segurança e condições de uso do relevante da estabilidade.

SOUZA E RIPPER (1998), definem desempenho como o comportamento em serviço de cada produto, no decorrer da vida útil, e a sua medida relativa será reflexo do resultado do trabalho desenvolvido nas etapas de projeto, construção e manutenção.

Ainda segundo esses autores, todas as estruturas e seus materiais deterioram-se com o tempo independente do programa de manutenção definido, uma vez que esta deterioração, estando no estado limite, torna-se irreversível. Existe o ponto em cada estrutura que, em função da deterioração, atinge níveis de desempenho insatisfatório tem sua variação conforme o tipo da estrutura. Tanto que algumas obras, devido a falhas de projeto e/ou execução, já iniciam suas vidas de maneira insatisfatória, no entanto, existem estruturas que mesmo ao chegar no final de sua vida útil projetada, ainda assim apresentando um bom desempenho.

Existe o fato de uma estrutura, mesmo apresentando um desempenho insatisfatório, não significa que ela esteja condenada. Para isso, existe na Patologia das Estruturas, a avaliação da estrutura, como também os modos de intervenção técnica para que seja possível a sua reabilitação. Na Figura 9 segue a ilustração que identifica as medidas a serem tomadas mediante o desempenho da estrutura.

Figura 9 - Medidas conforme o desempenho



Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998.

Segundo MATTOS (2015), o fator desempenho pode ser alterado com determinados aspectos naturais e artificiais que podem reduzir, manter ou até incrementá-lo numa obra, haja vista que esses aspectos interferem exatamente no comportamento do sistema em serviço. Os principais pilares envolvidos nessa questão são: as condições ambientais, decisões de projeto e tipo de material.

Conclui-se que o desempenho de uma estrutura em serviço é uma incógnita que muda com o grau de agressividade do ambiente ao qual está inserida a construção, a geometria e a disposição dos elementos carregados, como também a resistência do material utilizado e suas características físico-químicas.

2.2.2 Durabilidade

A durabilidade é um fator determinante na busca de estruturas de qualidade. De acordo com MATTOS (2015), sua definição muitas vezes se confunde com a de desempenho, pois igual a esta, a durabilidade de um material, de um sistema estrutural ou até mesmo de uma edificação como um todo é dada pela sua capacidade de se comportar em condições satisfatórias quando em serviço, ou seja, pela sua capacidade de apresentar um bom desempenho quando em uso.

É estabelecido no capítulo cinco da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2014) os requisitos mínimos de qualidade que as estruturas de concreto devem satisfazer:

- Capacidade resistente (segurança à ruptura)
- Desempenho em serviço (capacidade de se manter em condições plenas de utilização, sem apresentar danos que comprometam o uso da estrutura)
- Durabilidade (capacidade de resistir às influências ambientais)

As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de acordo com as diretrizes da norma, no intuito de que seja conservada sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço ao longo do período correspondente à sua vida útil.

MATTOS (2015) afirma que um sistema estrutural considerado durável é aquele capaz de resistir às ações mecânicas e ambientais as quais está exposto. Porém é difícil a quantificação matemática de previsão de durabilidade de determinado objeto, já que ele pode estar submetido a diversas esferas de solicitação de carga e de condição natural, do modo que ele poderá ser mais durável em uma situação e menos em outra. Assim sendo, é possível avaliar a questão do ponto de vista inverso, prevendo a durabilidade do sistema a partir das características do material empregado e das suas condições de exposição, admitindo-se que a situação de submissão da estrutura se manterá durante toda sua vida útil.

Para MEHTA E MONTEIRO (2008), existe uma relação próxima entre resistência e durabilidade, sendo esta última definida como a vida útil de um material sob dadas condições ambiental.

SOUZA E RIPPER (1998) enfatizam que a associação entre os conceitos de vida útil e durabilidade é inevitável. Uma vez que conhecida, ou estimada, as características de deterioração do concreto e dos sistemas estruturais, é definido pelos autores a durabilidade como o parâmetro que relaciona essas características, individualizando cada construção pelas respostas que dará aos efeitos da agressividade ambiental, e definindo desta forma, a vida útil da estrutura.

Para esses autores citados acima, o entendimento da concepção de uma construção durável resulta na adoção de um conjunto de decisões e procedimentos que garantam à estrutura e aos materiais que nele fazem parte, um desempenho suficiente no decorrer da vida útil da construção.

Dentro da temática do concreto armado, HELENE *et.al.* (2011), mostra a regra dos 4C, assinalando os quatro fatores que definem a durabilidade do sistema:

1. Composição ou traço do concreto;
2. Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
3. Cura efetiva do concreto na estrutura;
4. Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

Sabe-se que um concreto com o traço mal dimensionado pode gerar problemas como na capacidade resistiva do concreto, um adensamento mal executado resulta em altos índices de vazios, uma cura insuficiente indica baixo grau de hidratação do cimento e um cobrimento inadequado proporciona uma menor proteção ao aço existente na peça. É de conhecimento que quando esses quatro aspectos não tiverem conformidade, irão induzir à porosidade, permeabilidade e incapacidade protetora do material, proporcionando o surgimento de meios difusores para elementos naturais que o deteriorarão (MATTOS, 2015).

De acordo com o autor acima, é pertinente notar que, com o crescimento tecnológico e intelectual dos últimos anos, o consumo de cimento em estruturas tem diminuído, mesmo sabendo que requerem concretos cada vez mais resistentes, acarretando em uma positividade na relação custo-benefício; porém, essa medida tem interferido diretamente na durabilidade do material, já que gera um aumento de vazios e conseqüentemente tornando-o mais poroso e mais sujeito à ação química.

Outro fator importante a se frisar é com relação a ação da água, que é um fluido de grande poder de deterioração de estruturas de concreto, que, ao encontrar as facilidades de difusão em um material poroso, reage internamente com a pasta de

cimento, propiciando assim a sua degradação. Portanto, em se tratando de durabilidade em sistemas estruturais de concreto armado, as características que mais se devem ter atenção são as que dizem a respeito ao fator porosidade, devendo então, ser definidos sob o aspecto da durabilidade os seguintes parâmetros: dosagem mínima de cimento, fator água/cimento máximo, classe de resistência mínima do concreto, cobrimento mínimo das armaduras, método de cura (MATTOS, 2015).

Segundo HELENE (1992), várias construções revelam-se com significativas manifestações patológicas, gerando não somente o comprometimento com o aspecto estético, como também, em boa parte das vezes, na capacidade resistente, podendo levar a estrutura ao colapso.

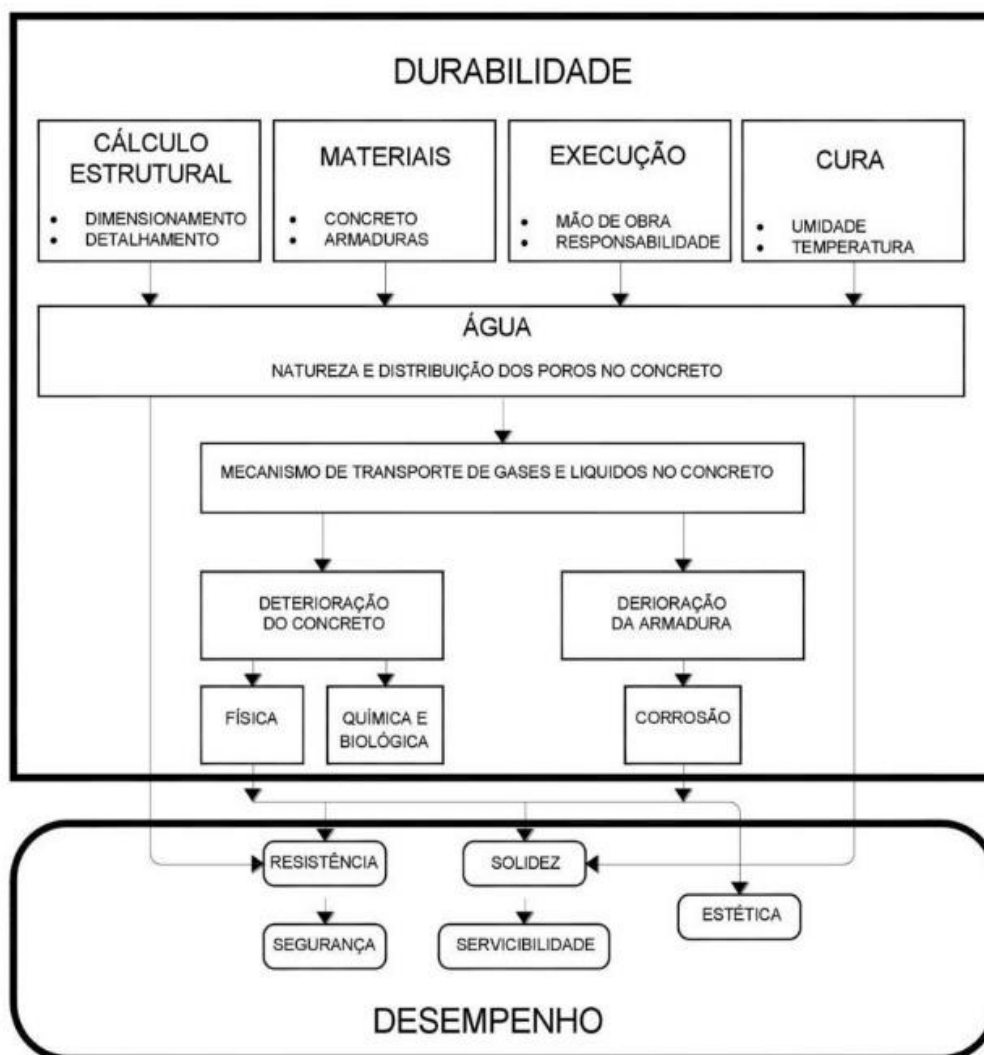
Segundo SOUZA E RIPPER (1998), as normas e regulamentos estabelecem critérios que permitem aos responsáveis individualizar, convenientemente, modelos duráveis para as suas construções, a partir da definição de classes de exposição das estruturas e de seus componentes em função da deterioração a que estarão submetidas, a partir de:

- corrosão das armaduras, sob efeito da carbonatação e/ou dos cloretos, por tipo de ambiente;
- ação do frio e/ou do calor, também por tipo de ambiente;
- agressividade química.

A Figura 10 resume os parâmetros relacionados com os critérios para a obtenção de uma construção durável.

Figura 10 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho das estruturas de concreto

Fonte: SOUZA E RIPPER, 1998.



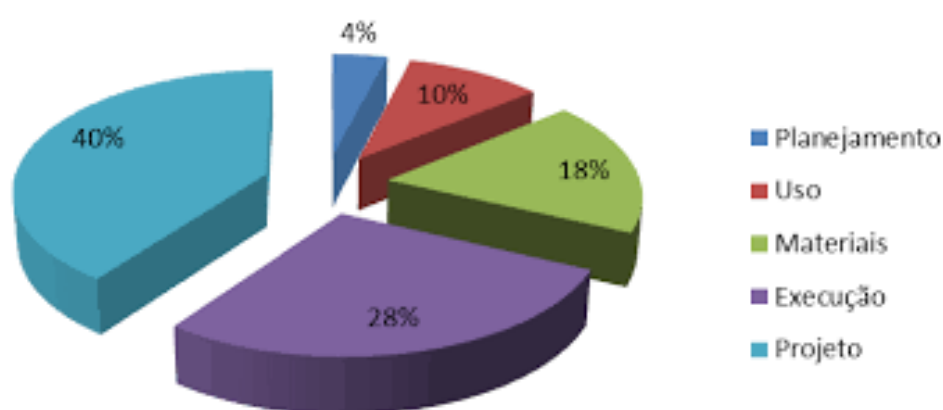
2.2.2.1 Origens E Causas Das Manifestações Patológicas

De acordo com MATTOS (2015) a problemática estrutural tem sua origem encontrada em uma das fases do ciclo de vida do sistema construtivo, dentre eles a concepção, o projeto, a execução e o uso, da maneira que possivelmente a adoção de outra atitude na etapa envolvida no processo patológico poderia resultar em uma estrutura sã e inerte ao agente agressor.

Porém, vale salientar que o mecanismo de desenvolvimento da doença pode também estar associado a uma origem natural, da forma que não seria possível a adoção de quaisquer atitudes preventivas.

A divisão de fases é defendida por HELENE (1992), em contexto de estudo patológico, de uma forma diferente, fazendo a particularização dos controles dos materiais e o planejamento como etapas constituintes do ciclo. Ainda é apresentado pelo autor um gráfico que mostra as porcentagens de ocorrência de problemas deletérios referentes a cada fase, como é o mostrado na Figura 11 abaixo:

Figura 11 - Origem dos problemas patológicos.



Fonte: HELENE, 1992.

Para SOUZA E RIPPER (1998), retirando os casos em que acontecem catástrofes naturais, caracterizadas por solicitações violentas de caráter imprevisível, o fator preponderante que há nas manifestações patológicas são as falhas que ocorrem no decorrer da realização de uma ou mais atividades referentes ao processo da construção civil: concepção (projeto), execução (construção) e utilização (manutenção).

MEDEIROS, H. (2010) cita dentro desta concepção, as causas das manifestações patológicas: movimentação térmica, impactos, sobrecargas, abrasão, concentração de armaduras, retração hidráulica e térmica, alta relação a/c, exposição a ambientes agressivos, excesso de vibração, ação da água, falhas de concretagem e falta de proteção superficial.

AGUIAR (2006) ensina ainda que a causa da manifestação patológica é função da natureza da degradação, ou seja, varia com a essência físico-química do dano e com a situação de carga e ambiental em que se encontra a peça estrutural. Sendo assim, SOUZA E RIPPER (1998) separam as causas da deterioração das estruturas de concreto armado em causas extrínsecas e intrínsecas. As causas extrínsecas independem do corpo estrutural em si, podendo ser vistas como os fatores que atacam a estrutura de fora para dentro, já as causas intrínsecas são aquelas inerentes à própria estrutura.

Dentre as causas extrínsecas, estão:

- Falhas humanas durante o projeto;
- Falhas humanas durante a utilização;
- Ações mecânicas;
- Ações físicas;
- Ações químicas;
- Ações biológicas.

Dentre as causas intrínsecas mencionadas por SOUSA E RIPPER (1998):

- Falhas humanas durante a construção: deficiências de concretagem, deficiências nas armaduras, inadequação de escoramentos e fôrmas, utilização incorreta de materiais de construção, incluindo utilização de agregados reativos, instaurando a possibilidade de geração de reações expansivas no concreto;
- Falhas humanas durante a utilização: ausência de manutenção;
- Causas naturais: causas próprias à estrutura porosa do concreto; causas químicas (reações internas do concreto, expansibilidade de certos constituintes do cimento, presença de cloretos, ácidos, sais e água), causas físicas, causas biológicas (ação de sulfetos presente nos esgotos).

Vale salientar que para identificar as causas das patologias do concreto é preciso observar suas manifestações que ocorrem normalmente nas partes externas das estruturas. No entanto, existem partes externas que não são normalmente visualizadas, como as total ou parcialmente enterradas (fundações, arrimos, piscinas);

as faces internas das juntas de dilatação; e as do interior de galerias e reservatórios. Nesses locais, os chamados danos ocultos só são detectados se forem programadas e executadas inspeções específicas. É necessário também identificar em qual etapa do processo construtivo se originou a manifestação patológica, uma vez que a definição da origem permite identificar, por exemplo, os responsáveis judiciais pelo cometimento da falha.

2.2.2.2 Grau de Agressividade

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

Ainda é feito por ela explanações quanto ao traço do concreto e também de como efetuar a sua cura. Podendo-se assim dizer que todos esses fatores afetam de forma geral, na durabilidade do sistema sob o aspecto ambiental. Porém com relação à capacidade resistente, considerando as solicitações mecânicas na estrutura, a NBR 6118, determina limites de fissuração que indicarão quão durável deverá ser o elemento, da maneira que não seja ultrapassada as restrições estabelecidas.

A norma, nos seus itens 6 e 7, trata da questão da durabilidade. Já no subitem 6.4.2 ela diz: “Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 2 e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes”.

Tabela 2 - Classes de Agressividade Ambiental

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT 2014)

Para complementar sobre a questão da agressividade, a NBR 6118 afirma que: “a agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto”.

KULISCH (2011) informa que sabendo que a durabilidade de uma estrutura depende das características do concreto e da qualidade, como também da espessura do concreto que faz o cobrimento da armadura, a norma mostra os valores mínimos de relação água/cimento, classe do concreto e cobrimento nominal, em relação à classe de agressividade previamente estipulada. As Tabelas 3 e 4 da NBR 6118, elucidam estes aspectos.

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	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.

Fonte: NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT 2014)

Tabela 4 - Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV ³
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje ²	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
Concreto Protendido ¹	Todos	30	35	45	55

1) Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

2) Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

3) Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT 2014)

Para que uma edificação seja durável, é necessário passar pela adoção de decisões de projeto e procedimentos de execução ao qual garantam à estrutura e aos materiais nele empregados um desempenho satisfatório, ao longo de sua vida útil,

visando à resistência aos ataques físico-químicos ambientais e à resistência mecânica dos elementos. De acordo com BATTAGIN (2019), conhecendo-se o grau de agressividade do ambiente em que a estrutura se encontra, existem algumas maneiras de prevenir possíveis manifestações patológicas, utilizando-se, por exemplo: o uso de concretos menos permeáveis, com baixa relação a/c, o uso de cimentos de alto-forno, pozolânicos ou resistentes aos sulfatos, que apresentam um comportamento mais favorável com relação à durabilidade.

2.2.2.3 Agentes de Deterioração

De acordo com o que já foi visto e citado durante o presente trabalho, SOUZA E RIPPER (1998) reconhecem a água como sendo um dos principais elementos que influenciam na questão da durabilidade em estruturas de concreto. Já que é a quantidade de água no concreto e a sua relação com a quantidade de ligante o elemento básico que irá controlar as características como a densidade, porosidade, compacidade, permeabilidade, fissuração e capilaridade, como também a sua resistência mecânica, que no final irão indicar a qualidade do material e assim também classificar se a estrutura será durável ou não.

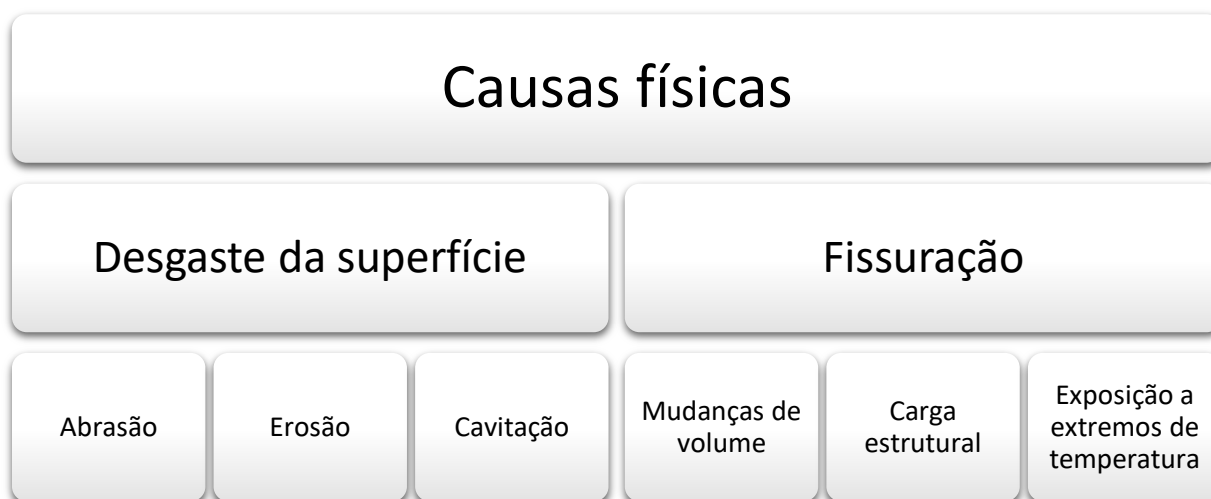
SOUZA E RIPPER (1998) abordam ainda sobre outro fator referente a agressividade ambiental, ou seja, a capacidade de transporte de líquidos e gases presentes no meio ambiente para o interior do concreto. Eles enfatizam que a combinação dos agentes ambientais como temperatura, umidade, salinidade, vento, chuva, agressividade química ou biológica, transportados para a massa de concreto, juntamente com resposta da massa de concreto com a tal ação, constituem dessa forma os principais elementos do processo de caracterização da durabilidade.

MEDEIROS, H (2010), separa os agentes físicos, químicos e biológicos responsáveis pela deterioração das estruturas de concreto. Os agentes físicos são relativos à variação de temperatura, umidade, ciclos de gelo e degelo, ciclos de umedecimento e secagem. Os agentes químicos se referem à carbonatação, maresia (água do mar), corrosão, chuva ácida, ataque de ácidos, águas brandas e resíduos industriais. Já os agentes biológicos se referem a micro-organismos, algas, solos e águas contaminadas.

METHA E MONTEIRO (2008) ainda dividem as causas de deterioração do concreto em físicas e químicas e destringem cada uma delas com as suas devidas características.

Inicialmente falando das causas físicas de deterioração, os autores supracitados as agrupam em duas categorias. A primeira é desgaste superficial ou perda de massa, onde se incluem os fenômenos de abrasão, erosão e cavitação. A segunda é a fissuração, onde se enquadram as mudanças de volume (gradientes normais de temperatura e umidade, e a pressão de cristalização de sais nos poros), o carregamento estrutural e a exposição a extremos de temperatura, como por exemplo os ciclos de gelo-degelo e a ação do fogo. A Figura 12 apresenta uma classificação para as causas físicas de deterioração do concreto.

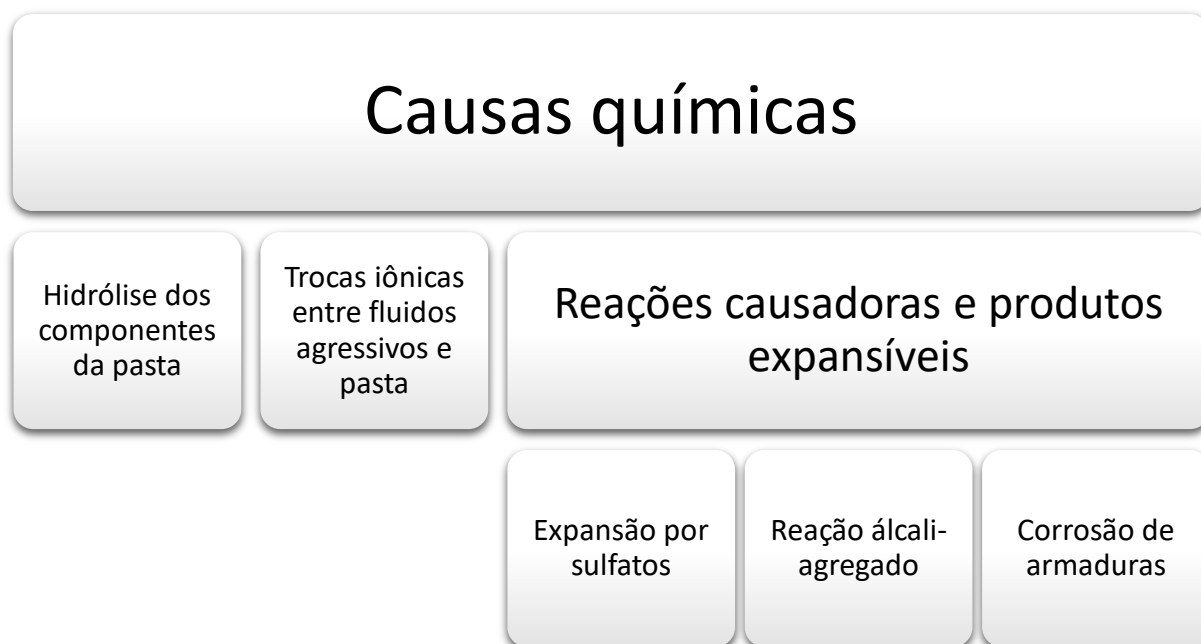
Figura 12 - Esquema das causas físicas de deterioração



Fonte: HELENE, 1992.

De forma similar METHA E MONTEIRO (2008) continuam com a explanação das causas químicas de deterioração do concreto, e as subdividem em três categorias. A primeira é a de hidrólise dos componentes da pasta por água mole. A segunda se dá pelas reações de troca catiônica entre fluidos agressivos e a pasta de cimento. E por último, existem as reações químicas envolvendo a formação de produtos expansivos, como a expansão por ataque de sulfatos, a reação álcali-agregado e a corrosão da armadura do concreto. A Figura 13 a seguir trás uma representação dos tipos de causas.

Figura 13 - Esquema das causas químicas da deterioração



Fonte: HELENE, 1992.

É verificado que o ataque químico ele acontece pela decomposição de produtos de hidratação do cimento e formação de outros produtos. Esses novos produtos podem ser lixiviados caso forem solúveis; se por acaso eles forem insolúveis, eles podem se expandir no próprio local onde se formam (NEVILLE, 1997).

É enfatizado por HELENE (1992) que a vulnerabilidade do concreto ao ataque químico depende basicamente da alcalinidade, da permeabilidade, e da reatividade dos compostos hidratados do cimento. Porém para BAUER (1994), a ação dos agentes agressivos depende em primeiro lugar da sua concentração.

De acordo com METHA E MONTEIRO (2008), deve-se enfatizar que a distinção entre as causas físicas e químicas de deterioração é meramente arbitrária e possui simplesmente um caráter explicativo, uma vez que, na prática, as duas frequentemente se sobrepõem. É de conhecimento que a água em sólidos porosos é a causa de muitos processos físicos de deterioração, podendo se tornar também um meio de transporte de íons agressivos, e desta forma transformando-se na fonte de processos químicos de degradação. Em geral, a deterioração do concreto dificilmente se deve a apenas uma causa, e desta forma é possível verificar que as causas físicas e químicas de deterioração normalmente estão interligadas e de maneira mútua se

reforçando, onde muitas vezes se torna impossível a separação das causas e seus efeitos.

Como exemplo, temos uma situação em que a perda de massa por desgaste superficial e a fissuração aumentam a permeabilidade do concreto, tornando-se a causa inicial para um ou mais processos de deterioração química. Ou então ao contrário, que por meio dos efeitos nocivos dos fenômenos químicos geram então a propagação dos efeitos físicos, como por exemplo, a lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida por água mole ou fluidos ácidos, aumentará a porosidade do concreto, e desta forma deixando o material mais suscetível à abrasão e erosão (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Em relação aos mecanismos mais importantes e frequentes de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto, HELENE et al (2011), divide em mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto e mecanismos preponderantes de deterioração relativos às armaduras.

Fora os mecanismos de deterioração do concreto e da armadura, já citados acima, GARCIA (1999) incluem a retração, retenção de fuligem e fungos e concentração salina, e a autora ainda considera que os conhecidos mecanismos de deterioração propriamente ditos também são todos aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação e outros considerados em qualquer norma ou código regional, nacional ou internacional.

2.2.2.4 Principais Manifestações Patológicas no Concreto

Segundo HELENE (1992), pode-se entender a Patologia das Construções como a parte da Engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as origens e causas dos defeitos que ocorrem nas obras civis, cabendo então a ser interpretada como o estudo das partes que constituem o diagnóstico do problema. O autor ainda menciona que à terapia, cabe estudar a correção e a solução de tais problemas patológicos. Ele cita também as manifestações patológicas de maior incidência nas estruturas de concreto:

- Manchas superficiais – 22%
- Fissuras ativas e passivas – 21%
- Corrosão de armadura – 20%
- Ninhos de concretagem – 20%
- Flechas excessivas – 10%
- Degradação química – 7%

- Manchas superficiais

Segundo SOTANA et al. (2019) as manchas podem ter várias causas, tais como: pela lixiviação; pela pega diferenciada do concreto, ocorrida por um atraso de concretagem; posicionamento dos agregados graúdos muito próximos a superfície; pela má aplicação das mantas de cura; como também ser indício de oxidação nas armaduras, entre outras. Com relação a este último item, a corrosão no concreto armado, normalmente, acontece em áreas mais expostas à umidade e aos agentes agressivos, ou em estruturas com muitas falhas, como ninhos de concretagem que, pela alta porosidade local, acabam por facilitar a penetração de agentes agressivos, visto na Figura 14. A oxidação da armadura diminui a vida útil de toda a estrutura.

Figura 14: Machas superficiais no concreto devido à corrosão de armaduras por presença de umidade



Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Thiago00000/patologia-das-estruturas-piso-concreto-e-revestimentos> (acesso em 04/09/2019).

- Fissuras ativas e passivas

As fissuras ou trincas são os sinais mais frequentes de problemas nas estruturas e suas causas são as mais variadas. As fissuras são danos superficiais, normalmente decorrentes de uso de cimento de baixa qualidade, que se resolvem com a aplicação de massa acrílica no local afetado. Já as trincas necessitam de atenção profissional, pois são mais profundas e podem, até mesmo, atravessar toda a estrutura.

Segundo CORSINI (2010), as fissuras podem começar a surgir de forma pacífica. Na execução do projeto arquitetônico é um dos tipos mais comuns de patologias nas edificações e podem interferir na estética, na durabilidade e nas características estruturais da obra. Ela pode ser um indício de algum problema estrutural mais grave. Pelo fato de toda fissura originar uma possível patologia mais grave (trinca e rachadura), como visto na Figura 15.

Figura 15: Trinca em estrutura de concreto

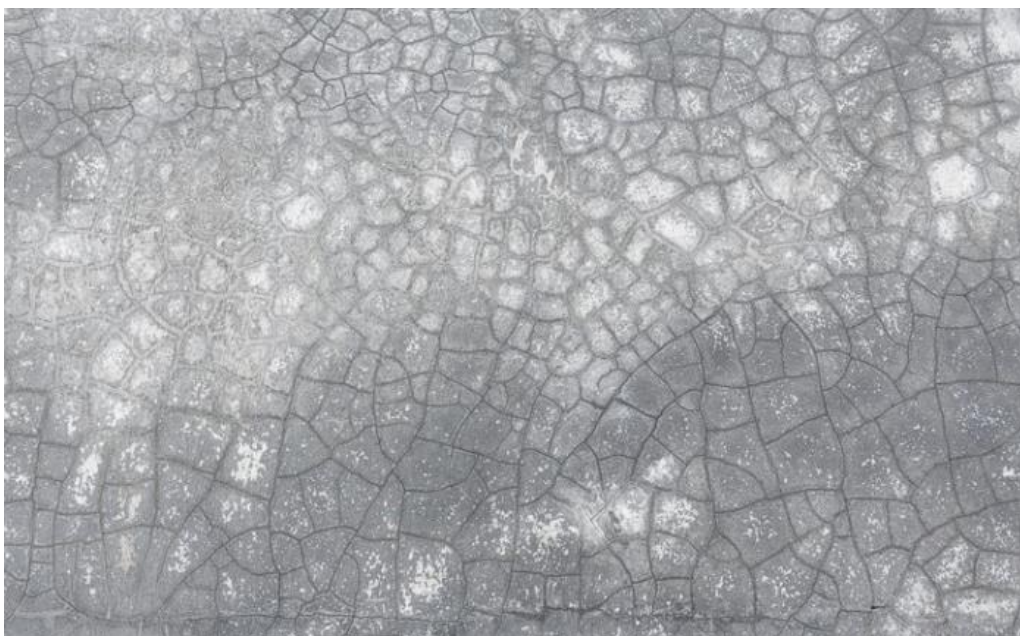


Disponível em: <https://www.plantasdecasas.com/8-fatores-que-causam-rachaduras-e-fissuras-concreto/> (acesso em 04/09/2019).

As fissuras ou trincas são classificadas em dois grupos: as ativas – quando apresentam variação de abertura –, e as inativas ou passivas – que não têm variação. Entre as causas estão às vibrações, retração hidráulica, variações térmicas, esforços solicitantes excessivos, flexão e cisalhamento.

Um dos problemas mais comuns com concreto são as fissuras. Ela pode apresentar na superfície várias rachaduras interconectadas. Mesmo que a resistência do concreto não seja afetada, os danos aparecem quando a laje está úmida. As fissuras do concreto acontecem quando a pasta de cimento chega a superfície e se contrai, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16: Fissuras interconectadas em laje de concreto



Disponível em: <https://www.atex.com.br/blog/materiais/5-problemas-comuns-em-estruturas-de-concreto-e-como-evita-los/> (acesso em 04/09/2019).

Elas também podem acontecer por:

- Falha na preparação: Cada tipo de concreto deve ser preparado com as proporções corretas entre: cimento, água, pedra brita e areia. Qualquer erro de medida pode fazer com o concreto sofra influências ambientais e estruturais, podendo surgir o aparecimento de rachaduras e fissuras.
- Excesso de umidade: Acrescentar mais água que o recomendado na hora de preparar a massa de cimento, enfraquece a resistência do concreto, além disso, faz com que a aplicação do concreto seja irregular, favorecendo outros problemas na construção.
- Estresse ambiental: Fatores ambientais, como chuvas, insolação, tremores de terra e outros fenômenos naturais podem favorecer o desgaste do cimento e o aparecimento de rachaduras e fissuras ao longo do tempo.

- **Infiltração:** Vazamentos na rede hidráulica de uma construção acabam por fazer com que a água penetre no concreto, o que causa corrosão do ferro ao longo do tempo. Assim começam a surgir fissuras e rachaduras no material. Quando visualizado o problema, o reparo deve ser feito com extrema urgência.
- **Retração por secagem:** Assim como o excesso de umidade, a falta também é prejudicial. Essa falta de umidade se chama retração por secagem, com a falta de água na mistura, o concreto se contrai e trinca.

- Corrosão de armadura

A corrosão nas armaduras de concreto é uma das patologias mais frequentes nas edificações. As corrosões das armaduras podem determinar o fissuramento do concreto e até seu deslocamento fazendo com que sua armadura fique exposta ao ambiente. A corrosão é frequentemente relacionada à presença de teores críticos de íons de cloreto no concreto ou no abaixamento do seu pH devido às reações com compostos presentes no ar atmosférico, especialmente o dióxido de carbono (ARAÚJO, 2013). A armadura de aço pode ser definida como material metálico que em contato com ambientes agressivos estão sujeitos à corrosão. Podem ocorrer dois tipos de corrosão: a corrosão eletroquímica (aquosa) e a corrosão química (corrosão seca). A corrosão eletroquímica vai ocorrer quando as estruturas entram em contato com soluções aquosas, como água doce ou do mar, como o solo, as atmosferas úmidas. A corrosão química é um processo lento e não provoca deterioração superficial das superfícies metálicas (exceto quando se tratar de gases extremamente agressivos) (BERTOLINI, 2010). Normalmente, em obras civis só ocorre corrosão eletroquímica. Figura 17 mostra um exemplo deste tipo de patologia.

Figura 17: Corrosão na armadura de uma viga



Disponível em: <https://plugin.grupohct.com.br/tag/corrosao-em-armaduras-de-concreto/> (acesso em 04/09/2019).

- Ninhos de concretagem

De acordo com NAKAMURA (2019), os popularmente conhecidos como bicheiras ou nichos de concretagem, são os vazios de concretagem, ou seja, são defeitos em pilares, vigas, lajes ou paredes que se manifestam por espaços não preenchidos no concreto, havendo assim vazios na massa de concreto, agregados sem o envolvimento de argamassa e um concreto sem homogeneidade dos componentes. As causas prováveis para esse tipo de patologia são a baixa trabalhabilidade do concreto, insuficiência no transporte, lançamento e adensamento do concreto, como também a alta densidade de armaduras na peça. As consequências dessa patologia de estruturas de concreto armado, variam de problemas estéticos que demandam o uso extra de materiais para revestimento, ao comprometimento da capacidade de suporte e da durabilidade da estrutura. Em casos mais severos, essas falhas de concretagem podem levar à segregação do concreto e expor as armaduras, provocando sua corrosão e, em último grau, o colapso da estrutura. Figuras 18 e 19 representam esse tipo de manifestação patológica.

Figura 18: Ninho de concretagem de uma viga, originalmente encoberto por concreto que não penetrou entre a fôrma e as armaduras.



Disponível em: <https://pt.slideshare.net/Thiagooooo/patologia-das-estruturas-piso-concreto-e-revestimentos> (acesso em 04/09/2019).

Figura 19: Pilar com ferragens expostas (ninhos de concretagem) após a concretagem devido a falhas no processo de adensamento do concreto.

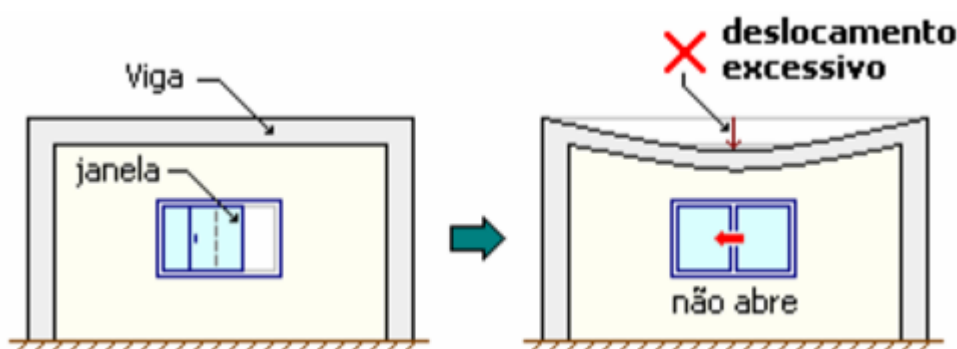


Disponível em: <https://construcaocivil.info/pilar-com-ferragens-expostas-ninhos-de-concretagem-apos-a-concretagem-por-conta-de-falhas-no-processo-de-adensamento-do-concreto-ferramenta-utilizada-para-adensamento-vibrador-de-imersao-obra-e/> (acesso em 04/09/2019).

- Flechas excessivas

As flechas excessivas ocorrem por vários fatores, tais como: grandes vãos, mal dimensionamento das estruturas (exemplo vigas, lajes e pilares) com espessuras inadequadas e menores que o necessário, com ferragens insuficientes, com a Resistência Característica do Concreto à Compressão (f_{ck}) abaixo do devido, entre outros. Podendo dessa forma gerar problemas principalmente como fissuração e chegar a levar até a ruptura, como também existe o problema do efeito visual causado pelas deformações na peça (MOURA, 2019). Esse tipo de patologia pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Exemplo de flexão excessiva em viga



Disponível em: http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/ELS_NBR6118.pdf (acesso em 04/09/2019).

- Degradação química

As reações químicas que provocam a degradação do concreto podem ser resultantes de interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio ambiente externo e os constituintes da pasta de cimento como também os agregados, ou podem resultar de reações internas, tipo reação álcali-agregado, ou da reação da hidratação retardada CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento Portland, ou ainda, da corrosão eletroquímica da armadura do concreto ou até das reações com sulfatos que é o tema deste presente trabalho. Convém ressaltar que as reações químicas se manifestam através de deficiências físicas do concreto, tais como aumento da porosidade e da permeabilidade, diminuição da resistência, fissuração e lascamento (NORMA DNIT 090/2006). É exemplificado um tipo dessa patologia na Figura 21.

Figura 21: Degradação química no concreto por lixiviação



Disponível em: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-lixiviacao.html> (acesso em 04/09/2019).

Além dessas manifestações já citadas temos as seguintes que podem indicar a existência de patologias no concreto: desagregação, erosão e desgaste, deslocamento ou esfoliação, segregação, eflorescência, calcinação, perda de aderência entre concretos (nas juntas de concretagem), porosidade, permeabilidade, entre outros.

MEDEIROS, H. (2010) cita as principais patologias por agentes químicos e ambientais: corrosão de armaduras, carbonatação, ataque de sulfatos, ataque de soluções ácidas e ação de cloretos.

2.2.2.5 Ambientes Agressivos

Ao se estudar as possíveis formas de deterioração do concreto, é importante salientar que além dos processos químicos e físicos apresentados, existem outros fatores que podem agir diretamente e de maneira deletéria no concreto.

Nesta temática, temos que é de suma importância a consideração e o estudo do meio ambiente e os agentes agressivos encontrados nesse ao qual a estrutura é inserida. Alguns exemplos de ambientes que podemos adiantar são os grandes centros urbanos, industriais e atmosferas marítimas, que segundo HELENE (1992) a degradação das superfícies de concreto das edificações nesses ambientes são mais significativas; MEDEIROS, H. (2010) acrescenta as edificações industriais e as estações de tratamento de esgotos domésticos e industriais. A seguir, serão abordadas com mais detalhes a classificação dos diferentes tipos de atmosferas existentes e os agentes agressivos que podem interferir no concreto.

- Atmosfera rural

De acordo com GARCIA (1999), à atmosfera rural é uma região ao ar livre, com grande distância das fontes poluidoras, já que essa atmosfera contém uma fraca ação agressiva, a não ser que haja uma fonte natural de gás ou sólido, como esterco e estrume que liberem NH_3 e SO_2 na fermentação, os gases encontrados são quase desprezíveis.

O processo de carbonatação é mais lento também do que em outras regiões. E em relação a chuva dessa região, onde consta pequenas cidades sem indústrias, o seu pH "natural", na faixa de 6,5.

- Atmosfera urbana e industrial

De acordo com GARCIA (1999), nas regiões ao ar livre nos maiores centros populacionais, contém atmosferas que possuem impurezas em forma de óxidos de enxofre (SO_2), fuligem ácida e outros agentes agressivos, tais como CO_2 , NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), H_2S , SO_4^- , etc. Já em ambientes de zonas industriais é possível ver a presença de todos esses gases já citados, e podendo complementar que o SO_2 é capaz de oxidar-se e gerar o H_2SO_4 .

Dessas substâncias a mais comum nesse tipo de atmosfera urbana é a presença de SO_2 e H_2S no ar originados a partir da queima de combustíveis que contém enxofre ou então pela ação bacteriológica de rios e empresas. Podendo-se constatar também que o pH da água de chuva de centros urbanos e industriais pode variar de 3,5 a 4,0, que já é considerada bastante ácida.

Segundo KULISCH (2011), ao se falar dos grandes centros urbanos e industriais, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB menciona

alguns dos principais poluentes emitidos por indústrias e por veículos automotivos: monóxido de carbono (CO) - resultante da queima incompleta de combustíveis fósseis; material particulado (poeiras, fumaças e todo tipo de material suspenso); dióxido de enxofre (SO₂) - resultante da queima de combustíveis que contém enxofre (óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina); ozônio (O₃) - produto da reação entre óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis na presença de luz solar; hidrocarbonetos (HC) - gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos orgânicos voláteis; óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) - formados durante o processo de combustão. Gases combustíveis e gases de escapamento das indústrias podem conter ácidos minerais livres como ácido sulfúrico, ácidos orgânicos, ácido acético, ácidos sulfurosos e ácidos sulfídricos. A água contendo os componentes gasosos que foram dissolvidos e formado assim as precipitações, tem a capacidade para agredir o concreto (BAUER, 1994).

- Atmosfera marinha e água do mar

Segundo GARCIA (1999), nas regiões ao ar livre, sobre o mar e também perto da costa existem os cloretos de sódio e magnésio, na forma de cristais como também na forma de gotículas de água salgada, mais conhecida como névoa salina.

KULISCH (2011) menciona que nas atmosferas marítimas, os sais de magnésio, sódio e potássio como também os sulfatos são os agentes mais agressivos ao concreto, enquanto os mais agressivos à armadura são os cloretos. Esses sais são retirados do mar pelas ondas e transportados pelos ventos, tendo a possibilidade de se deslocar por grandes distâncias. BATTAGIN (2019) fala que além da situação dos edifícios litorâneos que sofrem com a maresia, ainda há estruturas sujeitas às variações dos níveis das marés serem as mais atacadas, já que elas estão mais propensas a receberem outros processos químicos, físicos e biológicos.

Em relação aos cloretos, GARCIA (1999) explica que eles têm uma ação mais danosa e profunda, e que, por estarem dissolvidos na água, eles adentram na estrutura porosa do concreto, por meio da capilaridade, higroscopicidade ou permeabilidade. Nos processos de molhagem e secagem aumentam-se a concentração de sais no concreto, e quando atingem um determinado teor, chegam a despassivar a armadura, e conseqüentemente, proporcionando a corrosão da mesma.

A corrosão tem uma velocidade na atmosfera marinha na ordem de 30 a 40 vezes maior que na atmosfera rural.

- Microclima (atmosfera viciada)

De acordo com GARCIA (1999) são consideradas microclima as regiões em locais fechados que possuem uma baixa taxa de renovação de ar. Podendo tomar-se como exemplo a ação do ácido sulfúrico, produzido em coletores e interceptores de esgoto.

Ainda segundo essa autora, existem certos edifícios industriais que abrigam determinados processos químicos, sendo considerados desta forma, como atmosferas viciadas. Em comparação aos ambientes com atmosfera ao ar livre da comunidade vizinha à indústria, é possível encontrar nesses ambientes de atmosfera viciada, teores de SO_2 , NH_3 e H_2S , até 100 vezes maiores. A exemplo desses casos temos: fábricas de papel e celulose, processamento de rayon, fertilizantes, queima de óleo combustível para fornos, onde os cuidados na prevenção da deterioração do concreto devem ser bem intensificados.

- Águas puras

A definição para águas puras é que elas não contêm substâncias dissolvidas ou as que contêm são em quantidades ínfimas. Sendo possível dizer que quanto mais pura for uma água, maior o seu poder ou capacidade dissolvente.

Para GARCIA (1999), a água pura também é conhecida como água mole, como por exemplo a água potável, onde quanto menos dura, com menos carbonato de cálcio e magnésio que ela possua, maior será o seu poder dissolvente. Sendo admitido então que toda água com mais de $150 \text{ mg/l} = 0,0015\%$ de sólidos (resíduos) dissolvidos (não evaporáveis) é agressiva ao concreto.

- Águas residuais ácidas

São todas as águas de origem doméstica, como também industriais, que tem grande potencial de agressividade ao concreto. Principalmente, as águas de indústrias que utilizam coque, indústrias de papel e celulose, indústrias de álcool e açúcar, curtume, tinturarias, galvanoplastia e laticínios.

- Demais substâncias agressivas

Existem outros meios agressivos além dos que já foram citados anteriormente, como também existem mais uma série de substâncias que podem deteriorar o concreto, sendo assim capaz de encontrá-las por exemplo, em estruturas destinadas ao armazenamento de certos produtos, tais como, vinho, ácido, sucos de frutas, cereais, adubos e outros, sendo capaz de desencadear as reações deletérias por formação de sais solúveis.

2.3 REAÇÕES EXPANSIVAS

As reações de expansibilidade que ocorrem no concreto podem gerar fissuras e deterioramento, causando desta forma a perda da durabilidade do concreto em grande velocidade. O tempo e a velocidade das reações irão depender do tipo de exposição do elemento estrutural, das condições ambientais, da ação de águas agressivas que penetram pelas fissuras e poros, e também do contato das armaduras com o ar. Tais reações são favorecidas pelo grau de umidade do ambiente e do fator água/cimento elevado, como também pelas elevadas temperaturas, que as aceleram (SOUZA e RIPPER, 1998).

De acordo com MEHTA E MONTEIRO (2008), as reações químicas que envolvem a formação de produtos expansivos podem levar a certos efeitos danosos no concreto. Inicialmente a expansão pode ocorrer sem causar nenhum dano ao concreto, porém com o aumento das tensões internas pode iniciar o aparecimento das manifestações, tais como: fechamento de juntas de expansão, deformações, deslocamentos em diferentes partes da estrutura, fissuração, lascamento e pipocamento. É citado ainda pelos autores os quatro fenômenos associados às reações químicas expansivas: ataque de sulfato, reação álcali-agregado, hidratação tardia de CaO e MgO livres e corrosão da armadura.

Dentre essas reações expansivas, o presente trabalho irá abordar com mais detalhes somente o ataque de sulfatos.

2.4 AÇÃO DE SULFATOS NO CONCRETO

Segundo FILHO (1994), é antigo o estudo relevante ao comportamento do concreto em ambientes contaminados com sulfatos, sendo iniciado antes mesmo da década de 20. A partir de então, é de conhecimento que nas áreas em que o concreto tem contato com íons sulfato (SO_4^{2-}), existe a possibilidade de ocorrer uma violenta deterioração do material, sendo desta forma de suma importância adotar medidas no intuito de se evitar o problema.

FILHO (1994), menciona que a degradação do concreto devido a reação entre os compostos do cimento hidratados e os íons sulfatos oriundos de uma fonte externa e transportados pela água consegue assumir duas diferentes manifestações:

- Expansão e fissuração do concreto
- Perda progressiva de resistência, rigidez e massa

Segundo MEHTA E MONTEIRO (2008) essas duas manifestações podem suceder simultaneamente, porém uma delas predomina em função da concentração e da fonte dos íons sulfato, isto é, o cátion associado, na água de contato, como também da percentagem e constituição química do cimento componente do concreto.

De acordo com CÁNOVAS (1988) e NEVILLE (1975), são bastante significativos os prejuízos causados por esse tipo de deterioração, tanto que a importância dada a esta temática pode ser medida, visto que 75% de todas as publicações que abordavam sobre o problema da corrosão do concreto até 1975 se dedicavam à ação dos sulfatos.

Dentro deste capítulo será discutida esta questão, com o resumo dos pontos principais do processo agressivo, como também as formas de se evitar e tratar sobre esse problema que decorre nas estruturas de concreto.

2.4.1 Considerações Iniciais

FILHO (1994) explica que as experiências iniciais realizadas com corpos de prova sujeitos a soluções de sulfato, tinham o objetivo de se investigar o fenômeno agressivo que essa exposição resultaria, e trazendo no resultado que o conteúdo de Aluminato Tricálcico (C_3A) tinha correlação com a deterioração causada pelos sulfatos. Essa constatação tinha como justificativa baseada na possibilidade de

ocorrência de uma reação entre os íons sulfato externos e os compostos de aluminato oriundos da hidratação dos compostos do cimento, produzindo dessa forma o trissulfoaluminato hidratado de cálcio, também conhecido como etringita. Esta reação tem como consequência o aumento de volume, que por sua vez gera o tensionamento da matriz e origina a expansão do elemento de concreto.

De acordo com LAWRENCE (1990), foi desenvolvido nos anos 30 após a análise de resultados dessa natureza, o cimento resistente a sulfatos, que possuía uma redução no teor de C_3A em relação ao cimento Portland comum. Antigamente no Brasil, na norma NBR 5737 tinha se estabelecido dois tipos de cimento resistentes à sulfatos, porém as normas brasileiras atuais, que definem os tipos de cimento, não incluem mais as categorias a seguir.

- Cimento de moderada resistência aos sulfatos (MRS), com teor de C_3A limitado a 8%;
- Cimento de alta resistência a sulfatos (ARS), com teor de C_3A máximo inferior a 5%.

Foi apresentado um desempenho satisfatório em várias estruturas que foram construídas com os cimentos resistentes a sulfatos, no entanto, alguns casos o cimento resistente a sulfatos não trouxe bons resultados.

Segundo FILHO (1994), com o prosseguimento dos estudos na área, notou-se que vários resultados de pesquisas não tinham uma explicação teórica exata. Existia uma grande variação no desempenho de concretos moldados para resistir à ação dos sulfatos, visto que, uns conseguiam resistir por alguns anos, enquanto outros chegavam a durar décadas. Desta forma podendo-se verificar que o fenômeno em questão não podia ser explicado somente em função da reação sulfato/aluminato.

Mesmo com os avanços das investigações na área, a dúvida sobre o mecanismo exato da agressão ainda persistia, e vários pesquisadores que investigavam o assunto, como MOUKWA (1990), diziam que não havia sido totalmente esclarecido o mecanismo de degradação do concreto à ação dos sulfatos. MEHTA (1983) ressaltou que o fenômeno químico de formação da etringita não explicava de certo todas as manifestações físicas pertinentes ao ataque de sulfatos. E foi relatado ainda que em boa parte dos trabalhos na área trata da interação sulfato-

aluminato tricálcico (C_3A), contudo a agressão envolvia outras reações químicas importantes.

LAWRENCE (1990) destaca ainda da necessidade que houve em expandir e aprofundar o conhecimento e as pesquisas sobre o ataque de sulfatos quando iniciou-se uma propagação do uso de cimento com adições, uma vez que a simples análise química destes aglomerantes compostos não permitia que fosse estimado com precisão o seu comportamento frente à contaminação química por sulfatos. O autor ainda menciona que é necessário desenvolver testes de desempenho confiáveis, que sejam capaz de fornecer dados de apoio à decisão sobre como enfrentar o problema de ambientes contaminados.

Para FILHO (1994), estes motivos justificaram os esforços para o esclarecimento deste processo de degradação. Destarte, buscando alertar para o problema dos sulfatos e assim fornecer subsídios para a escolha do melhor concreto que irá ser usado em determinado tipo de ambiente.

2.4.2 Os Sais de Sulfato

2.4.2.1 Origem dos Sais

De acordo com FILHO (1994) os sulfatos podem ser encontrados em vários países do mundo em larga escala, sendo mais comuns nas águas marinhas, nas águas subterrâneas e nos esgotos industriais. Normalmente os sulfatos estão presentes em áreas planas, no qual há o acúmulo de sais ao longo do tempo sem que sejam carregados por fluxos de água subterrâneos. É normal que ocorra a deposição de uma camada esbranquiçada na superfície neste tipo de solo agressivo, sendo desta forma um indicativo da presença do problema. Recomendando-se que sejam sempre realizados testes, quando se atua neste tipo de área.

A maioria dos solos apresenta pequenas quantidades de sulfato na forma de gipsita $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (geralmente de 0,01 a 0,05% expresso como SO_4), sendo esta quantidade inofensiva ao concreto. É possível achar nas águas subterrâneas altas concentrações de sulfato de magnésio, sódio e potássio. O sulfato de amônia está normalmente presente em águas e terras agrícolas. Em efluentes de fornos que

utilizam combustíveis com alto teor de enxofre e da indústria química podem conter ácido sulfúrico. A decomposição de material orgânico em pântanos, lagos rasos, poços de mineração e tubulação de esgoto levam à formação do gás H_2S , que por sua vez, se transforma em ácido sulfúrico H_2SO_4 pela ação bacteriana. A água utilizada em torres de resfriamento de concreto também pode ser uma fonte potencial de ataque de sulfato, devido à formação gradual de sulfatos pela evaporação da água. Contudo, não é incomum encontrar concentrações superiores de sulfato e, desta forma, deletérias ao concreto, tanto em ambientes industriais e naturais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo FILHO (1994) os íons sulfato normalmente se originam da decomposição, por hidrólise, de sais presentes no solo ou na água, marinha ou subterrânea. São comumente chamados de alcalinos ou selenitosos os solos e águas que contém estes sais sulfatos. E em alguns solos argilosos, os teores de sulfato de cálcio, magnésio e sódio são tão elevados que a água subterrânea nestas regiões se torna uma legítima solução de sulfatos.

A contaminação por sulfatos também pode ser aérea. Segundo PERRY e SLATER (1981) o dióxido de enxofre é um dos poluentes mais comuns que há na atmosfera, mencionando suas prováveis fontes: as combustões domésticas, as emissões das usinas termelétricas, das refinarias de petróleo, das olarias e das usinas de aço e ferro. Existe uma enorme quantidade de SO_2 , como também de outras substâncias poluentes que advém da combustão em motores e processos industriais, que reagem com o vapor d'água presente na atmosfera e conseqüentemente podendo se precipitar sob a forma de chuva ácida, que se acumula sobre as construções e, ao evaporar, propicia a deposição dos sais nela contidos. Com o tempo esse fenômeno vai gradativamente aumentando a concentração de íons agressivos na superfície e no interior dos materiais constituintes das edificações, gerando sérios problemas, como por exemplo o sulfato que penetra no concreto e ocasiona a sua desagregação.

- Sulfato nas águas

Segundo MOCKAITIS (2008) as emissões de águas contaminadas por sulfato são separadas em duas origens: naturais ou antropogênicas. Primeiramente as emissões naturais são aquelas provenientes principalmente de águas oceânicas e de sais minerais inorgânicos presentes no solo, onde o sulfato tem a possibilidade de ser dissolvido por meio da percolação de águas pluviais e carregado para as camadas inferiores do solo, podendo passar por biotransformações pelas bactérias, produzindo desta forma sulfetos, que ao serem combinados com metais pesados adquirem uma forma insolúvel. Sendo assim, é possível que estes sulfetos insolúveis sejam reoxidados através da percolação de águas pluviais originando assim uma água rica em sulfato. No segundo ponto existem as emissões antropogênicas que são aquelas que se referem aos esgotos domésticos e industriais, que serão detalhados mais à frente.

Existem dois mecanismos de ação de águas sulfatadas sobre o concreto citados por BAUER (1994), que são: ação mecânica de microfissuração e reação química. A ação mecânica de microfissuração é decorrente da cristalização de sais devido à evaporação de água, especialmente em estruturas que são sujeitas ciclos de inundação e secagem. Como consequência, ocorre a destruição progressiva do concreto. Já o mecanismo de ação ocasionado por reações químicas, ocorre entre os elementos da água sulfatada e os componentes do concreto, gerando produtos expansivos que causam a fissuração.

Em relação a água do mar, FILHO (1994) menciona que ela apresenta também concentrações de sulfatos que podem provocar o processo agressivo, degradando o concreto. É verificado que a intensidade dos ataques é maior nas zonas em que há oscilações de nível, como de acordo com a ação mecânica de microfissuração citada acima, em que há variações nas condições de saturação, já que este fenômeno ocasiona a cristalização cíclica dos sais nos poros, proporcionando assim uma maior agressão.

Nas obras marítimas de concreto existe o contato direto com a água do mar e conseqüentemente a contínua ação dos elementos salinos nele presentes. HELENE (1986) define as atmosferas marinhas como sendo as regiões ao ar livre sobre o mar e perto da costa. A atmosfera marinha contém principalmente cloretos de sódio,

cloretos de magnésio e sulfatos. No Oceano Atlântico, os teores médios de sulfato são da ordem de 2800 mg/L.

A média global de salinidade normatizada para todos os oceanos de acordo com LIMA (2005), é de 35 partes por mil, sendo o terceiro íon mais frequente o sulfato, atrás apenas do cloreto (Cl^-) e do sódio (Na^+). A Tabela 5 abaixo é possível verificar a composição da água do mar em locais distintos.

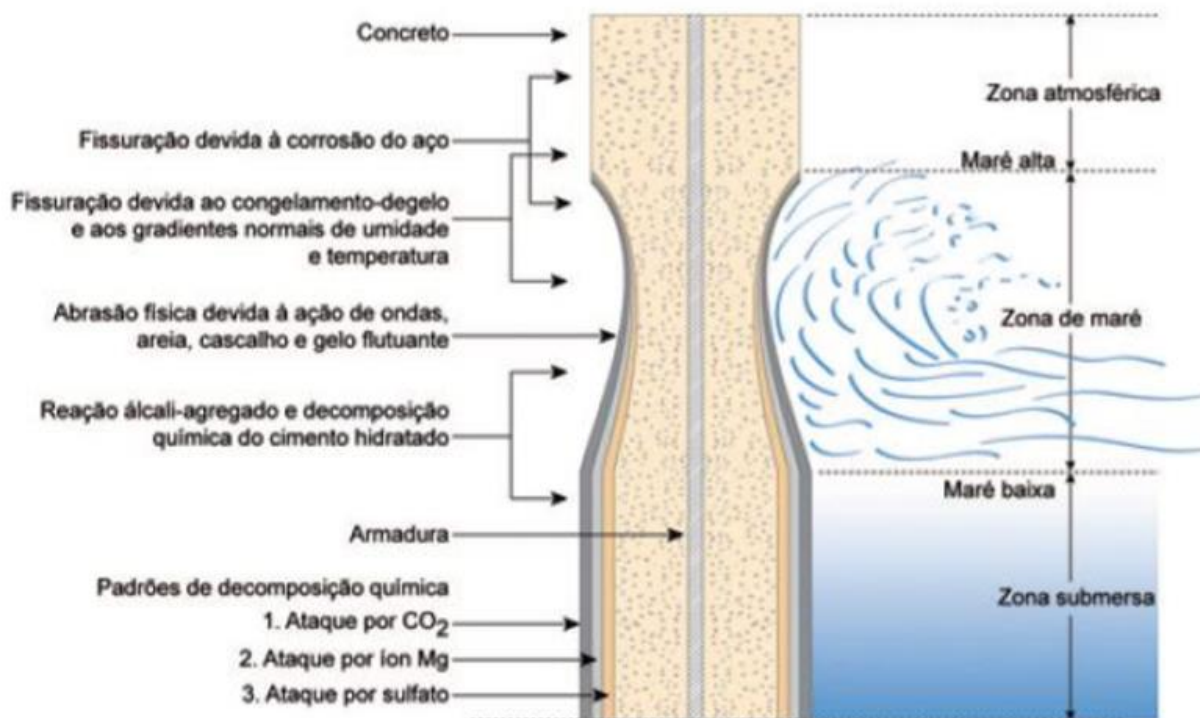
Tabela 5: Composição da água do mar. (a) Resultado médio de amostras de água coletadas em 3 pontos da costa brasileira (PRUDÊNCIO, 1979). (b) Dados da norma CETESB L.1.007. Constituição iônica aproximada da água do (c) Oceano Atlântico e (d) Mar Báltico(CEB,1992).

Componentes Químicos	Quantidade (mg/l)			
	(a)	(b)	(c)	(d)
Sódio	10050	11100	11000	3300
Potássio	590	400	500	nulo
Cálcio	510	480	700	nulo
Magnésio	1240	1410	1300	500
Cloretos	20200	20000	20000	4000
Sulfatos	2880	2810	2200	1200
Bicarbonatos	150	-	-	-
Sólidos Totais	40270	-	-	-
pH	7900	-	-	-
Densidade	1030	-	-	-

Fonte: FILHO, 1994.

LIMA (2005) separa em zonas as áreas de contato de um objeto ou estrutura com o mar. Essas zonas são: zona atmosférica marinha, zona de respingos, zona de variação de marés e zona submersa. As principais diferenças entre as zonas no que diz em relação ao ingresso de agentes agressivos, tem-se que a carbonatação é mais significativa apenas na zona de atmosfera marinha, enquanto a penetração de cloretos e o ataque por sulfatos são mais intensos na zona de respingos e na zona de variação de marés, como pode ser visto na Figura 22 abaixo. Com o aumento da cota, ou seja, com a distância em relação ao nível do mar, a intensidade do ataque por sulfatos diminui.

Figura 22: Representação de cilindro de concreto exposto à água do mar



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008.

De acordo com BAUER (1994), a concentração de sulfato nas águas subterrâneas pode ser elevada por causa do processo de oxidação de minerais sulfurosos de ferro, como por exemplo, a pirita (FeS_2) e marcasita (FeS_2 – polimorfo da pirita), acarretando na formação de sulfato ferroso (FeSO_4).

Segundo LIMA (2005), a chuva ácida apresenta compostos que são agressivos ao concreto por causa da sua acidez, possuindo um pH entre 2,2 e 4,5, que leva destarte a dissolução da pasta de cimento. De acordo com a CETESB, o dióxido de enxofre (SO_2) é o principal óxido, sendo gerado da utilização de combustíveis derivados de petróleo, como a gasolina e o óleo diesel, e de carvão mineral. Ao ser lançado na atmosfera, o SO_2 é oxidado, formando ácido sulfuroso (H_2SO_3), o qual entra em contato com a umidade atmosférica e forma ácido sulfúrico (H_2SO_4). Os aerossóis ácidos mais comuns são sulfato (SO_4^{2-}) e bissulfato (HSO_4^-), sendo oriundos da ionização do H_2SO_4 .

- Sulfato nos solos

Para BAUER (1994), é possível verificar os solos com sulfatos principalmente em formações de mineração do período jurássico da era terciária, cujas sedimentações levam anidrita e gesso. Ele menciona também que os sulfatos mais facilmente solúveis encontram-se nas vizinhanças de minas de sal.

De acordo com KULISCH (2011) os solos pantanosos (turfa) e lodaçais possuem diversas substâncias que atacam o concreto, como o gás carbônico que dissolve a cal; ácidos minerais livres principalmente em forma de ácido sulfúrico; sulfatos e ácidos orgânicos. Como também os solos pantanosos, os lodaçais e os solos argilosos podem conter sulfetos de ferro – FeS_2 (pirita, marcassita).

É possível identificar os solos agressivos pela coloração. Tendo conhecimento que os solos normais apresentam coloração variando do castanho ao castanho-amarelo, sendo então considerados suspeitos os solos de coloração cinza a negra, especialmente quando apresentarem manchas de ferrugem vermelho-castanho. As camadas de cor cinza clara à branca, sob os solos vegetais castanho-escuros a negros, indicam um caráter ácido do solo (BAUER, 1994).

- Sulfato nos agregados

É mencionado por MEHTA e MONTEIRO (2008) que os sulfetos de ferro e a gipsita estão entre os principais elementos presentes nos agregados que são prejudiciais. Os sulfetos de ferro são normalmente encontrados em agregados naturais, tais como, a pirita (FeS_2), marcasita (FeS_2) e pirrotita (FeS). É encontrado principalmente em rochas sedimentares a marcasita, que oxida-se rapidamente, transformando-se em ácido sulfúrico e hidróxidos de ferro. É indesejável a formação de ácido, especialmente em relação da corrosão potencial do aço em concretos armados e protendidos. A marcasita e algumas formas de pirita e pirrotita são possíveis responsáveis por reações expansivas no concreto, causando fissuras e pipocamentos.

Os minerais sulfatados mais abundantes são a gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado) e anidrita (sulfato de cálcio anidro), podendo elas estarem presentes como impurezas em rochas carbonáticas e folhelhos. Gipsita e anidrita, ainda podem ser

encontradas recobrando areia e pedregulhos e ambas, quando presentes no agregado, aumentam as chances de ataque por sulfatos ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

É detalhado por HASPARYK *et al.* (2002) as variedades de sulfeto de ferro que podem estar presentes nas rochas e agregados:

- Pirita (FeS_2): possui estrutura cúbica, tem a cor amarela dourada, com aspecto de latão polido, é insolúvel em ácido clorídrico e solúvel em ácido nítrico concentrado. Possui dureza entre 6 e 6,5. A alteração da pirita inicia-se normalmente pela oxidação para sulfato e eventualmente para hidróxido de ferro e hidratados.
- Pirrotita (Fe_{1-x}S): possui estrutura monoclinica, tem a cor escura, com tendência ao negro, além de ser solúvel em ácido clorídrico, liberando odor sulfídrico. Oxida-se facilmente em contato com o ar atmosférico, pulverizando-se, tornando-se muito sensível à reação com os aluminatos do cimento. É distinguido este material dos demais por ser magnético, pouco estável frente aos agentes atmosféricos e pegajoso ao tato, sendo categoricamente inaceitável o seu emprego como agregado. É o tipo de sulfeto considerado mais deletério para o concreto.
- Marcasita (FeS_2): possui estrutura rômica, tem a cor amarelo esverdeada (aspecto de estanho polido ou de latão claro polido), é insolúvel em ácido clorídrico e solúvel em ácido nítrico concentrado. Apresenta dureza similar à da pirita (6 a 6,5), porém oxida-se com muito mais facilidade, dando origem a manchas ferruginosas.
- Calcopirita (CuFeS_2): possui estrutura tetragonal, com uma cor amarela latão, frequentemente altera-se de modo superficial e iridescente. A calcopirita é semelhante aos minerais citados anteriormente, distinguindo-se pela cor amarela mais intensa em luz refletida e pela menor dureza (3,5 a 4), sendo riscada por um canivete. A calcopirita oxida-se por exposição ao ar e água ou por aquecimento ligeiro, dando sulfatos de ferro e cobre.

De acordo com HELENE (1986), qualquer elemento que seja incorporado ao concreto e contribua para o aumento de sua permeabilidade poderá ser considerado agressivo à armadura. Como por exemplo: teor elevado de matéria orgânica presente

no agregado, teor elevado de materiais pulverulentos, teor elevado de torrões de argila, matérias carbonosas, sulfetos e enxofre, eventualmente presentes em excesso nas adições de escória.

HELENE (1986) ainda acrescenta que, mesmo não sendo muito comum, o que também pode acarretar problemas é o emprego de agregados com concreções ferruginosas, na maioria resultantes de rochas em alteração. Agregados contendo piritas encontrados em granitos, gnaisses, rochas sedimentares e certas areias, goetita (óxido de ferro hidratado encontrado em concreções lateríticas), marcassita, pirrotita e concreções ferruginosas podem dar compostos expansivos e solúveis ao oxidarem-se. Isso gera vazios no concreto que favorecem para o aumento da permeabilidade e redução da proteção física do revestimento. Os produtos das reações também podem ser ácidos (as marcassitas e piritas podem gerar ácido sulfúrico e sulfatos), que irão contribuir para a aceleração do fenômeno de carbonatação do concreto, reduzindo assim a proteção química do revestimento.

É estabelecido pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009) os valores limites de reatividade álcali-agregado, teor de cloreto e teor de sulfatos para agregados procedentes de regiões litorâneas, extraídos de águas salobras ou quando houver suspeita de contaminação natural, como nas regiões onde ocorrem sulfatos naturais como a gipsita, ou industrial, em águas do lençol freático contaminadas por efluentes industriais, de acordo com a Tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Limites máximos para a expansão devida à reação álcali-agregado e teores de cloretos e sulfatos presentes nos agregados

Determinação	Método de ensaio	Limites
Reatividade álcali-agregado	ASTM C 1260	Expansão máxima de 0,10% aos 14 dias de cura agressiva
	ABNT NBR 9773	Expansão máxima de 0,05% aos 3 meses
		Expansão máxima de 0,10% aos 6 meses
Teor de cloretos (Cl ⁻)	ABNT NBR 9917 ABNT NBR 14832	< 0,2% em concreto simples
		< 0,1% em concreto armado
		< 0,01% em concreto protendido
Teor de sulfatos (SO ₄ ²⁻)*	ABNT NBR 9917	< 0,1%

* Agregados que excedam o limite estabelecido para sulfatos podem ser utilizados em concreto, desde que o teor total trazido ao concreto por todos os seus componentes (água, agregados, cimento, adições e aditivos químicos) não exceda 0,2% ou que fique comprovado o uso no concreto de cimento Portland resistente a sulfatos conforme a ABNT NBR 5737.

Fonte: NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009)

KULISCH (2011) cita as principais substâncias nocivas que podem estar presentes nos agregados:

- Impurezas de origem orgânica: na forma de húmus ou fragmentos vegetais carbonizados ou não, as impurezas orgânicas podem interferir nas reações de hidratação do cimento, introduzir fragmentos de baixa resistência mecânica e provocar manchas superficiais no concreto (carvão);
- Torrões de argila e materiais friáveis;
- Material pulverulento: as partículas de dimensão inferior 75 µm, quando em excesso, prejudicam a trabalhabilidade e provocam fissuração do concreto, aumentando o consumo de água;
- Minerais álcali-reativos: formas de sílica com diversos graus de cristalinidade;
- Impurezas salinas: cloretos, sulfatos, nitratos e sulfetos no agregado, principalmente no agregado miúdo, podendo provocar alterações na hidratação do cimento, surgimento de eflorescências, provocar expansões e acelerar a corrosão das armaduras;
- Resíduos industriais: contaminantes orgânicos (óleos, graxas, solventes) prejudicam a aderência do agregado com a pasta de cimento.

Segundo HASPARYK et al. (2002), os sintomas que aparecem em um concreto atacado por sulfetos são: manchas de ferrugem na superfície; fissuras mapeadas superficiais; intumescimento e desagregação do concreto; presença de uma película branca ao redor do agregado, facilmente visualizada através de lupa, onde estão presentes o sulfeto de ferro, além dos produtos de reação com o cimento (gesso e etringita); eflorescências brancas superficiais; baixa aderência pasta-agregado, devida à presença de fissuras e esfoliação na zona de contato; e deslocamentos estruturais.

- Sulfato nos esgotos

O íon sulfato é a forma mais estável e difundida dos compostos de enxofre, podendo aquele ser encontrado nos mais variados tipos de águas residuárias, desde o esgoto sanitário, com concentração de 20 a 50 mg/L até em descartes industriais, em concentrações que chegam a variar de 12000 a 35000 mg/L. Sendo destacado as

emissões industriais das indústrias de papel, de processamento de alimentos, de explosivos e atividades que fazem combustão de combustíveis fósseis (MOCKAITIS, 2008).

É exposto por METCALF e EDDY (2003) os valores referentes dos elementos que constitui os esgotos domésticos, da maneira que para vazões de águas residuárias de 750 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 20 mg/L, enquanto para vazões de água residuárias de 460 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 30 mg/L e por último para vazões de águas residuárias de 240 litro/percapita.dia, a concentração de sulfato está na faixa de 50 mg/L. É incluso nestes valores os constituintes adicionados por fontes comerciais, industriais e institucionais. No entanto, quando convém, os constituintes de fontes domésticas devem ser adicionados a estes valores, sendo este acréscimo de 15 a 30 mg/L de sulfato. A Tabela 7 abaixo apresenta um resumo do que foi citado.

Tabela 7: Concentração de sulfato: tabela resumo da concentração em esgotos domésticos

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

Fonte: METCALF; EDDY, 2003.

O afluente é o material que chega à ETE e efluente o material que dela sai, após o tratamento:

Figura 23: Representação esquemática de afluente e efluente



Fonte: KULISCH, 2011.

GLÓRIA (2009), através da Tabela 8, resume os valores usuais de concentração de sulfato e sulfeto encontrados nos esgotos domésticos.

Tabela 8: Faixas de variação das concentrações de sulfato e sulfeto para afluentes e efluentes dos reatores UASB tratando esgotos domésticos

Sulfato (mg/L)		Sulfeto (mg/L)	
Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
20 – 60	1 – 9	0 – 2	8 – 14
50 – 100	4 – 10	-	20 – 30

Fonte: KULISCH, 2011.

Já SARTI et al. (2008) citam os valores típicos de concentração de sulfatos de águas residuárias industriais, que se encontram na faixa de 180000 a 284000 mg/L. E para o esgoto sanitário, partindo de 50 amostras, a faixa da concentração de sulfatos varia de 10 a 31 mg/L.

Os valores usuais para os esgotos domésticos são especificados por GOSTELOW et al. (2001) na faixa de 3 a 6 mg/L de enxofre orgânico procedente principalmente da hidrólise do material proteico e uma média de 4 mg/L provenientes de detergentes domésticos sulfonados. No relevante ao enxofre inorgânico, o sulfato está presente em quantidades que dependem da dureza da água, variando de 30 a 60 mg/L. Os autores constam também que concentrações consideravelmente mais elevadas de sulfato podem resultar de infiltração de água ou fontes industriais.

De acordo com PINTO E TAKAGI (2007), cada ambiente das estações de tratamento de água e efluentes tem variações nos níveis de ataque ao concreto, sendo que o ataque pode ser proveniente dos próprios produtos químicos usados rotineiramente no tratamento. E os principais produtos utilizados no tratamento de água e esgotos estão listados na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Principais produtos utilizados no tratamento de água e esgotos

Coagulantes	Sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio	água e esgotos
Desinfetantes	Cloro gasoso, hipoclorito de sódio e hipoclorito de cálcio	água e esgotos
Correção de pH	Hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio e carbonato de sódio	água e esgotos
Fluoretação	Fluossilicato de sódio e ácido fluossilícico	Água
Algicidas	Sulfato de cobre e desinfetantes	Água

Fonte: PINTO; TAKAGI, 2007.

SILVA (1999) separa a categoria de coagulantes em ácidos, aos quais estão inclusos o sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$, sulfato ferroso $[FeSO_4 \cdot 7H_2O]$, cloreto férrico $[FeCl_3]$ e sulfato férrico $[Fe_2(SO_4)_3]$; e coagulantes básicos, como o aluminato de sódio $[NaAlO_2]$.

O sulfato de alumínio é enfatizado de acordo com a autora supracitada como o produto químico mais utilizado como coagulante no tratamento da água e efluentes por causa de diversos fatores: excelente formação de floco, relativa economia, facilidade de manuseio, eficiência na redução da cor, turbidez, DQO e DBO, sendo utilizado em faixas de pH de 5 a 8.

A autora ainda complementa que os demais coagulantes são utilizados em distintas faixas de pH: o sulfato ferroso é muito utilizado para tratamento de águas de elevado pH (na faixa de 8,5 a 11), o sulfato férrico é conveniente para tratamento de águas altamente coloridas ou ácidas (faixa do pH de 5 a 11) e o cloreto férrico produz bons flocos na faixa de pH de 5 a 11.

O MINISTÉRIO DA SAÚDE (2003) se refere aos algicidas, para a utilização deles como medida de controle interno para recuperação de corpos d'água eutrofizados. Medidas estas podem ser divididas em métodos físicos, compreendendo a circulação artificial da água, a aeração da camada mais profunda do corpo d'água, dragagem dos sedimentos, etc; métodos químicos, tais como precipitação e inativação do fósforo e uso de algicidas (sulfato de cobre, permanganato de potássio, entre outros); e métodos biológicos, como o uso de cianofagos e myxobactéria, e a biomanipulação.

Uma das medidas mais utilizadas em todo o mundo e também no Brasil, dentre as citadas anteriormente, é aplicação de algicidas, em particular o sulfato de cobre. Entretanto, essa técnica tem que ser usada de forma cuidadosa, já que leva à liberação de toxinas intracelulares das cianobactérias. (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2003)

2.4.2.2 Tipos e agressividade dos Sais

FILHO (1994) apresenta os mais conhecidos tipos de sais selenitosos que podem ser visualizados na Tabela 10, onde tem-se as informações sobre o aspecto e origem de cada um. Foi realizada uma classificação em três faixas: reduzido, médio e elevado potencial agressivo, a partir de dados sobre a solubilidade do sal e do seu efeito danoso sobre o concreto.

Um fator de grande importância é o tipo de cátion do sal, já que sua presença determina a existência de certas reações, principalmente uma troca catiônica com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que pode causar o aparecimento de hidróxidos com solubilidade variável. Os compostos mais relevantes pela sua agressividade e abundância são os solúveis sulfatos de sódio (Na_2SO_4), de magnésio (MgSO_4) e de cálcio (CaSO_4), que normalmente são encontrados em regiões de jazidas de minérios e de indústrias de papel, mas também existem tantos outros sulfatos como o sulfato de potássio (K_2SO_4) e o sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), encontrados também nas águas agrícolas como em outros locais que são indicados na Tabela 10 abaixo. Serão abordados, na ordem crescente de agressividade, com mais detalhes, os sulfatos de Cálcio, Sódio e Magnésio.

Tabela 10: Características dos principais tipos de sais selenitosos

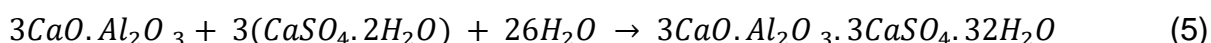
Tipo	Cátion	Cor	Solubil.	Origem	Agressividade
K ₂ SO ₄	Potássio	branca	baixa	água do mar / subterrânea	elevada
NH ₄ SO ₄	Amônia	branca	alta	fáb.explosivos / coque ind. quím. / águas subt.	elevada
Na ₂ SO ₄	Sódio	branca	alta	ind. quím / leite de mar / água do mar	elevada
CaSO ₄	Cálcio	branca	baixa	águas subterrâneas / escória de carbono	elevada
MgSO ₄	Magnésio	branca	alta	água do mar / subterrânea	elevada
CuSO ₄	Cobre	branca	alta	conservação de madeiras / galvanotecnia	elevada
FeSO ₄ / Fe ₂ (SO ₄) ₃	Ferro	verde/ branca	alta	desinfetante / tinturaria / tratamento de água	elevada
ZnSO ₄	Zinco	branca	baixa	ind. químicas/ tinturarias	média
KAISO ₄	Potássio/ Alumínio	branca	baixa	indústrias químicas	média
PbSO ₄	Chumbo	branca	muito baixa	indústrias químicas	reduzida
CoSO ₄	Cobalto	vermelha	baixa	-	reduzida
NiSO ₄	Níquel	verde	baixa	indústrias químicas	reduzida

Fonte: FILHO,1994.

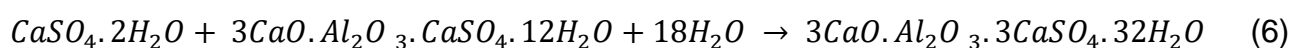
- Sulfato de Cálcio

De acordo com COSTA (2004), o composto de sulfato de cálcio que apresenta duas moléculas de água é conhecido comercialmente como gesso (CaSO₄.2H₂O). Ele pode ocorrer na natureza tanto na forma anidra (anidrita) quanto na hidratada, (gesso/gipso). Por causa da sua baixa solubilidade em água (máximo de 0,2%), o composto é considerado menos agressivo que o sulfato de sódio e de magnésio.

Na reação o sulfato de cálcio em forma de gipsita (CaSO₄.2H₂O) reage diretamente com o aluminato de tricálcico (3CaO.Al₂O₃) ou (C₃A), para formar o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, ou etringita (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O) (MATTOS, 2017). Representado pela EQUAÇÃO (5) abaixo:



Como também o sulfato de cálcio pode reagir com o monossulfoaluminato de cálcio (3CaO.Al₂O₃.CaSO₄.12H₂O) e formar também a etringita, como é demonstrado na EQUAÇÃO 6:



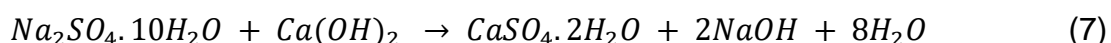
Segundo FILHO (1994) o sulfato de cálcio ainda sim é considerado um composto agressivo, uma vez que sua reação com os aluminatos hidratados causa um incremento de volume considerado, já que a etringita formada ocupa um volume 2.5 vezes maior que o aluminato tricálcico. Essa etringita se forma no concreto já endurecido, e sua expansão pode causar deformações gerando a fissuração da peça.

Este autor ainda destaca que, durante o processo de fabricação do cimento uma parcela de sulfato de cálcio já é incorporada ao clínquer no intuito de regular a pega. No entanto, no decorrer da hidratação, as condições químicas da solução resultante da dissolução dos compostos anidros são tais que ocorre a formação de monossulfoaluminato de cálcio hidratado, ao invés do trissulfoaluminato de cálcio hidratado. Pois como a estrutura resistente ainda não se desenvolveu por completo, o monossulfoaluminato pode se cristalizar sem provocar o aparecimento de tensões. Posteriormente, durante a exposição do concreto endurecido à solução externa contaminada com sulfatos, o monossulfoaluminato pode se dissolver e recrystalizar sobre a forma de trissulfoaluminato (etringita), gerando um aumento de volume dentro da estrutura já enrijecida.

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (2008), as expansões no concreto relacionadas ao sulfato são associadas à etringita, contudo, ainda é um tema controverso sobre os mecanismos pelos quais a formação da etringita causa expansão. As duas hipóteses mais aceitas são: a pressão exercida pelo crescimento dos cristais de etringita; e a expansão resultante da adsorção de água em meio alcalino por uma etringita pouco cristalina.

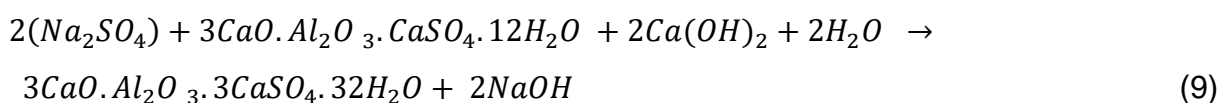
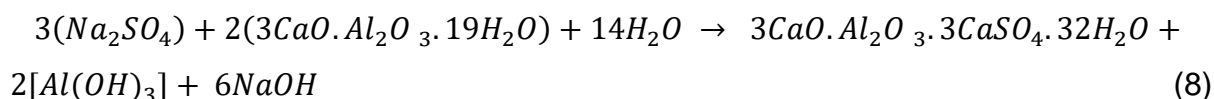
- Sulfato de Sódio

Também conhecido com Sal de Gláuber, participa da reação atuando na conversão do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), também chamada de Portlandita, em gesso, de acordo com a EQUAÇÃO (7) abaixo, e em seguida o produto dessa reação (o gesso) recombina-se com o aluminato tricálcico (C_3A) formando a etringita, que como já se sabe tem caráter expansivo e desta forma agrava o processo de degradação.



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

O sulfato de sódio pode reagir também com o aluminato de tricálcico (C₃A) e também com o monossulfoaluminato de cálcio e ambas formarem a etringita, como é demonstrado nas EQUAÇÕES (8) e (9) a seguir respectivamente:



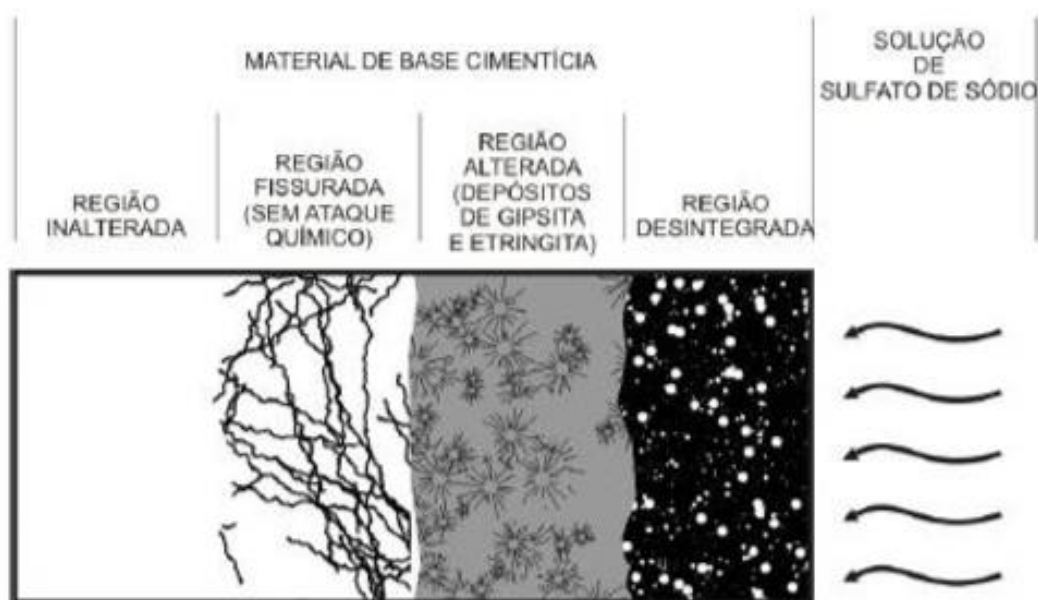
SANTHANAN, COHEN E OLEK (2003) *apud* SOUZA, R. B. de. (2006) ao descrever os passos do ataque do sulfato de sódio:

PASSO 1 – A solução agressiva de Na_2SO_4 difunde-se para o interior do material cimentício. PASSO 2 – Nas regiões próximas da superfície, começam a ser formadas etringita e gipsita. Estes compostos expansivos são formados nos vazios da pasta de cimento, não gerando tensões internas. PASSO 3 – Os compostos expansivos preenchem os vazios da pasta, esgotando a capacidade de acomodação da estrutura da pasta de cimento. Inicia-se a geração de tensões internas no material, que são suportadas pela região inalterada da pasta de cimento. PASSO 4 – A região inalterada quimicamente não suporta mais as tensões de tração geradas pelos compostos expansivos, iniciando um processo de fissuração. PASSO 5 – A solução agressiva de sulfatos continua a difundir-se para o interior do material com mais intensidade via área fissurada, reagindo com os compostos hidratados da pasta de cimento. Formam-se etringita e gipsita nesta região fissurada, que tende a expandir mais. Por fim a seção do material cimentício fica dividida em quatro regiões: região desintegrada; região de depósito de produtos de ataque; região com fissuração e; região sã.

FILHO (1994) menciona que a conversão do hidróxido em gesso caracteriza em um aumento de volume na ordem de 100%, sendo desta forma o volume de sólidos incrementado aproximadamente numa proporção de multiplicação por um fator dois.

A Figura 24 abaixo representa o Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio:

Figura 24: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de sódio



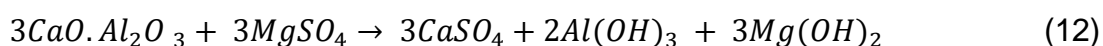
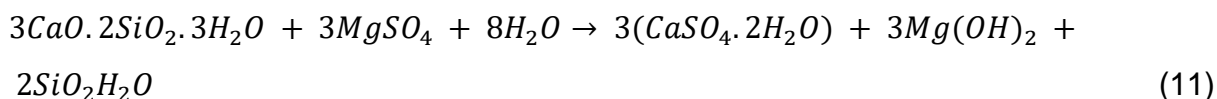
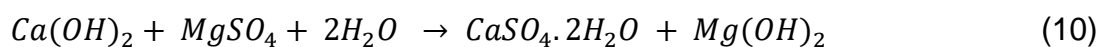
Fonte: SOUZA, RB.de, 2006

- Sulfato de Magnésio

Segundo FILHO (1994), esse composto também conhecido como Sal de Epsom ou “Sal Amargo”, é um elemento que chega a causar uma degradação intensa ao concreto, pois, ele pode tanto reagir com o hidróxido de cálcio e os aluminatos, como também pode atuar sobre os silicatos de cálcio hidratados ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ou C-S-H), que é um objeto que confere resistência mecânica, ou seja, atingindo a estrutura resistente do concreto. Esse tipo de sulfato é potencialmente mais perigoso que os demais, mesmo que na prática esta diferença nem sempre seja observável.

De acordo com KULISCH (2011) o ataque por MgSO_4 se divide em duas frentes de ataque: reação com o hidróxido de cálcio, formando gipsita e hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), também conhecida como brucita EQUAÇÃO (10) e reação com os elementos C-S-H, fragmentando-os em gipsita (gesso), hidróxido de magnésio e sílica gel EQUAÇÃO (11). Porém FILHO (1994) ainda menciona que o ataque também

pode ocorrer sobre o aluminato tricálcico, formando o sulfato de cálcio, hidróxido de alumínio e o hidróxido de magnésio EQUAÇÃO (12):



No ataque com sulfato de magnésio, nota-se que em todas as reações descritas acima, como por exemplo a da que ocorre a conversão do hidróxido de cálcio em gipsita, são acompanhadas pela formação do hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) também conhecida como brucita, que é um composto insolúvel em água e reduz a alcalinidade do sistema. Dessa forma MEHTA e MONTEIRO (2008), destacam que a estabilidade do C-S-H é reduzida e se solubiliza, reagindo com a solução agressiva de sulfatos e ocasionando um ataque mais severo.

Ainda se falando sobre a brucita, FILHO (1994) complementa que este composto pode se depositar nos poros do concreto ou na superfície, formando uma película que dificulta a difusão dos íons e chega a diminuir a velocidade da reação. De acordo com LAWRENCE (1990), sempre foi observado em corpos de prova estocados em soluções de sulfato de magnésio uma cobertura gelatinosa de brucita, sendo que, nessa situação dois fatores entram em conflito: o primeiro seria a eficiência da película de brucita em prevenir o ataque, e segundo o próprio aumento da concentração de sulfatos no interior do concreto faz com que seja acelerada a reação deletéria.

Vale ressaltar que esse retardamento da corrosão causado pela película é apenas eficaz em águas em repouso, já que em correntes subterrâneas essa película pode ser dissolvida, e tendo assim seu efeito eliminado (FILHO, 1994).

BAUER (1994) cita que existe em uma das reações uma troca entre o magnésio e o cálcio. O magnésio se deposita sob a forma de um composto dificilmente solúvel, enquanto que uma solução de sulfato de cálcio puro adentra ao concreto e pode formar, com o aluminato de cálcio, a etringita, que provoca a expansão.

Um dos fatores que torna o sulfato de magnésio ser mais agressivo ao concreto, que os de sódio e de cálcio, é o fato daquele ser quase duas vezes mais solúvel que o primeiro e trinta e cinco vezes mais que o segundo (KULISCH, 2011).

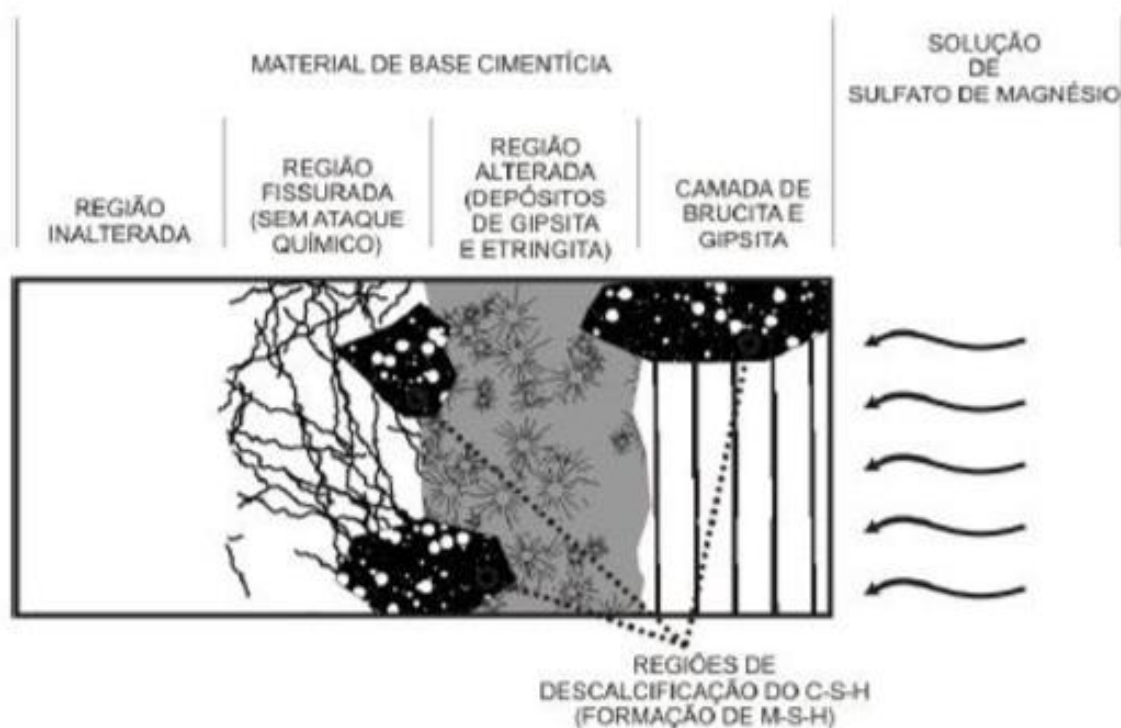
De acordo com a ASTM C 1012 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2004), o ataque em concentrações inferiores a 3,2g SO₄/L ou 4,0g MgSO₄/L caracteriza-se pela formação da etringita. Concentrações de sulfato que estejam entre 3,2g SO₄/L e 6,0g SO₄/L ou 4,0g MgSO₄/L a 7,5g MgSO₄/L caracterizam-se pela formação de etringita e gipsita e a deterioração e fissuração podem ser lentas e de difícil percepção. E em concentrações acima de 6,0g SO₄/L ou 7,5g MgSO₄/L, a reação caracteriza-se pela formação de hidróxido de magnésio, gesso e gel de sílica, não ocorrendo a formação de etringita e a deterioração do concreto é muito severa por causa do aumento da concentração de magnésio.

SANTHANAN, COHEN E OLEK (2003) apud SOUZA, R. B. de. (2006) ao descrever os passos do ataque do sulfato de magnésio:

PASSO 1 – A solução agressiva de MgSO₄ difunde-se para o interior do material. PASSO 2 – Uma camada de Mg(OH)₂ (brucita) forma-se rapidamente na superfície do corpo-de-prova, a partir da reação da solução agressiva com a portlandita (Ca(OH)₂) da pasta de cimento hidratada. Forma-se também gipsita. PASSO 3 – A formação de Mg(OH)₂ consome muita portlandita, conseqüentemente o pH da pasta diminui. Para manter o equilíbrio, o C-S-H libera portlandita, aumentando novamente o pH, contribuindo para a descalcificação da estrutura. PASSO 4 – Depois de formada a camada de Mg(OH)₂, a solução agressiva penetra no interior do corpo-de-prova por difusão, porém esta é dificultada pela camada de Mg(OH)₂, que é um gel impermeável. PASSO 5 – Forma-se gipsita e etringita nas regiões próximas à superfície (porém sob a camada de Mg(OH)₂), causando expansão e tensões internas nas camadas inalteradas, o que gera fissuração nessa região (similar ao que acontece no ataque por sulfato de sódio). PASSO 6 – Em algumas regiões, a solução agressiva de sulfatos, devido à ação do cátion Mg²⁺, degrada diretamente o C-S-H, resultando em perda de resistência e desintegração da pasta. A seção do material cimentício fica dividida em regiões: camada de Mg(OH)₂ e gipsita paralela à superfície do corpo-de-prova; região de depósito de produtos de ataque; regiões isoladas de descalcificação do C-S-H, formando M-S-H; região com fissuração e; região sã.

A Figura 25 abaixo representa o modelo de ataque de base cimentícia por ataque de sulfato de magnésio:

Figura 25: Modelo de ataque em material de base cimentícia por sulfato de magnésio



Fonte: SOUZA, R.B., 2006.

Devido a possibilidade de ataque aos silicatos, os cimentos resistentes a sulfatos não mostram um desempenho satisfatório quando expostos à presença de sais de sulfato de magnésio. Isso porque, segundo a constatação de LAWRENCE (1990), os concretos com adição de microssílica não são tão eficientes na presença deste sal. Podendo-se dizer também que a microssílica, ao retirar hidróxido de cálcio em razão da reação pozolânica, potencializa a agressão, já que contribui para reduzir mais ainda o pH.

2.4.3 O Ataque de Sulfatos

Um breve resumo sobre o ataque de sulfatos será visto a seguir, esclarecendo-se sobre a natureza, evolução e intensidade do ataque. Mas antes será destacado e revisto alguns pontos.

De início NEVILLE (1997) menciona que os sais em sua forma sólida não atacam o concreto. Apenas quando estes sais estão dissolvidos que reagem com a pasta de cimento hidratado.

COSTA (2004) destaca que os dois principais meios de ataque por sulfatos são: reação com os produtos de hidratação do aluminato tricálcico não hidratado (C₃A) produzindo etringita; e reação com o hidróxido de cálcio produzindo gipsita. No entanto, no concreto endurecido, a formação da etringita resultante do ataque de sulfato pode levar à expansão, e, devido à baixa resistência à tração do concreto, pode fissurar a peça.

É esquematizado por COSTA (2004) as reações de maneira simplificada:

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

SOUZA, R. B. de. (2006) destaca 4 formas de ataque por sulfatos: ingresso de íons sulfato para o interior da pasta, cristalização dos sais de sulfato, formação de etringita tardia (DEF – delayed ettringite formation) e formação de taumasita:

- O ingresso de íons sulfato de fontes externas para o interior da pasta de cimento hidratada resulta em reações químicas: formação de etringita ou formação de gipsita.
- A cristalização dos sais de sulfato ocorre quando a concentração de sais torna-se muito elevada, devido à evaporação da água.
- A formação de etringita tardia – DEF – ocorre quando o íon sulfato não é oriundo de fontes externas, mas sim, do interior do próprio material, através de agregados contaminados com gipsita ou cimento com teor de sulfatos muito alto.

- A formação de taumasita ($\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) ocorre devido ao ataque simultâneo de sulfatos (SO_4^{2-}) e carbonatos (CO_3^{2-}), associado à baixa temperatura. É resultado da reação entre carbonatos, sulfatos de cálcio, água e silicatos e cálcio hidratados (SOUZA, R. B. de., 2006).

NEVILLE (1997) explica que as consequências do ataque por sulfatos não envolvem somente a desagregação por expansão e fissuração, como também na perda da resistência do concreto por causa da perda da coesão na pasta de cimento como também pela perda da aderência entre a pasta de cimento e as partículas de agregado. Assim sendo, METHA e MONTEIRO (2008) ressaltam duas formas de ataque: expansão (com conseqüente fissuração, aumentando a permeabilidade do concreto e facilitando a penetração de águas agressivas) e perda progressiva de resistência simultânea à perda de massa (devido à perda da coesão dos produtos de hidratação).

Ainda segundo NEVILLE (1997), o ataque por sulfatos gera no concreto uma aparência esbranquiçada particular. De início a deterioração parte dos cantos e arestas seguida de uma fissuração progressiva e lascamento que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole.

Em razão do ataque aos compostos alcalinos de cálcio, há redução do pH com conseqüente interferência na película passivadora da armadura, no caso de concreto armado, da maneira que em determinado ponto esta proteção será insuficiente para combater a ação dos elementos degradantes do aço. As obras normalmente atacadas são as que estão em contato direto com o solo ou com as águas naturais ou de efluentes, portanto as estruturas de fundações, de sistemas de esgotamento, de ambientes marinhos, entre outras (MATTOS, 2015).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), os componentes da pasta de cimento mais vulneráveis ao ataque pelos íons sulfato são o hidróxido de cálcio e as fases que contêm alumina. Estes autores ainda citam que além da expansão causada pela etringita, outro mecanismo está associado à formação de gipsita como resultado de reações por troca de cátions. Dependendo do cátion presente na solução de sulfato (Na^+ , K^+ ou Mg^{2+}), tanto o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como o C-S-H podem ser convertidos em gipsita.

Outro produto do ataque de sulfatos é a taumasita. De acordo com PINHEIRO-ALVES *et al.* (2007), a taumasita é formada pela evolução da etringita ou pelo ataque de sulfatos. Para que ocorra, são necessárias as presenças de íons sulfatos,

carbonatos, silicatos cálcicos e água, originando então o composto químico indicado por $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$. Este produto é bastante nocivo à medida que, segundo COUTINHO (2001), implica na redução das propriedades ligantes do concreto endurecido, com perda de resistência mecânica e transformação da matriz numa massa pastosa e sem coesão.

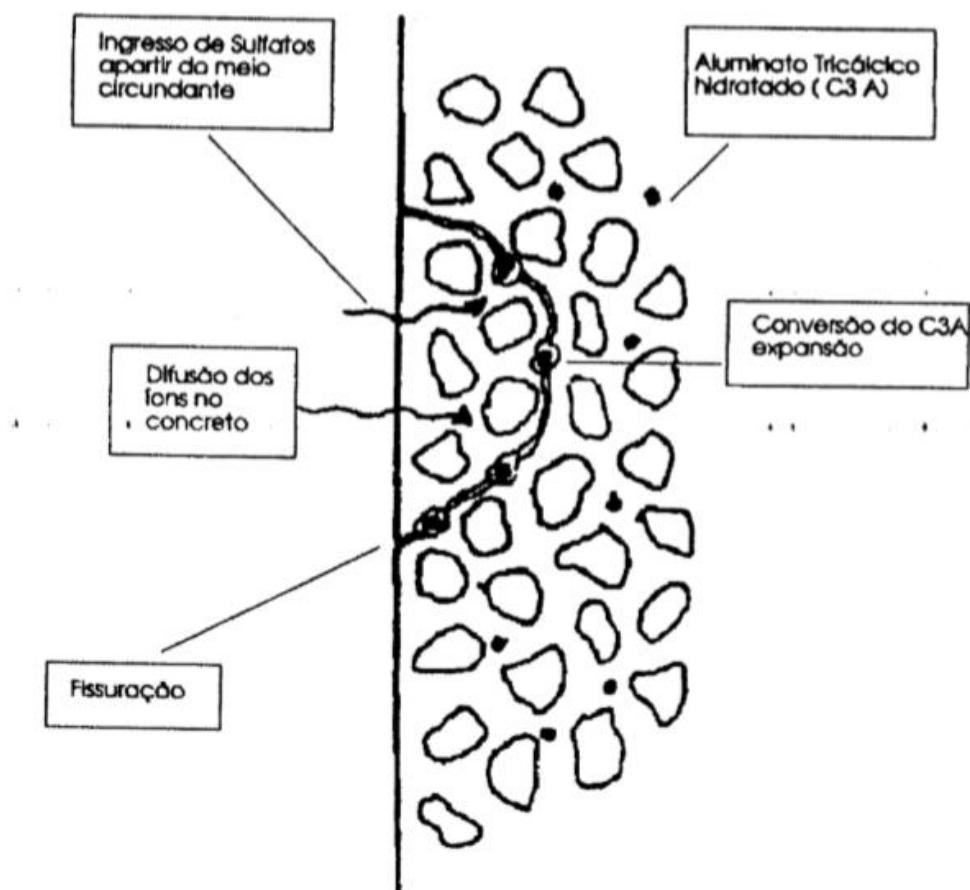
Em relação as manifestações patológicas têm-se que as principais são a alteração para coloração esbranquiçada ou marrom do concreto, e, em virtude da expansão advinda da etringita formada e das possíveis corrosões do aço, a desagregação e fissuração do concreto. Pode-se verificar ainda a ocorrência de amolecimento da pasta do concreto endurecido quando em casos de formação de taumasita. (MATTOS, 2015)

Ainda segundo o autor acima, a sintomatologia é dada por perda de resistência mecânica do concreto, uma vez que o ataque é expansivo, podendo quebrar ligações mecânicas do elemento, a redução do pH, podendo haver despassivação da armadura, e a mudança do caráter físico da estrutura, em função da degradação do concreto.

2.4.3.1 Natureza do Ataque

Como já citado anteriormente, o fenômeno agressivo que acontece no concreto devido à exposição a sulfatos, causa uma expansão que com o tempo, pode levar à fissuração da matriz, à fragilização e ao lascamento das camadas exteriores, e possivelmente, à completa desintegração do material, causando o colapso da peça. Normalmente o início da agressão se dá pelos cantos e arestas, se espalhando superficialmente e no final vai penetrando gradualmente na peça. No decorrer deste processo geralmente ocorre uma perda da rigidez e da resistência do concreto. Segundo FILHO (1994), a sintomatologia, exibida na Figura 26 abaixo, advém da penetração dos íons SO_4^{2-} , que penetram na rede de poros do concreto, e dessa forma se combinam, principalmente com o C_3A , provocando expansão.

Figura 26: Representação esquemática do ataque de sulfatos.



Fonte: FILHO, 1994.

O mecanismo clássico para se explicar o ataque de sulfatos no concreto é justamente oriundo da observação da reação química entre os sulfatos e os aluminatos, ao qual é verificado a formação de etringita, que adsorve diversas moléculas de água e conseqüentemente ocupa um maior volume, gerando o aparecimento de tensões que causam a deterioração do concreto.

De acordo com CALLEJA (1986), mesmo com todo o conhecimento acumulado no assunto ter sido principalmente focalizado nesta reação entre o aluminato tricálcico resultante das reações de hidratação e os sulfatos externos, não é somente a interrelação entre o C_3A e o íon sulfato que causa deterioração, pois ocorre também a interação entre os íons sulfato e outros compostos hidratados da matriz. Foi esclarecido no boletim 183 do CEB (1992) que os sulfatos também podem se combinar com íons de cálcio, sulfato e hidroxila da pasta de cimento endurecida.

WOODS (1968) realçava que, em determinadas condições, o sulfato de sódio tem a possibilidade de reagir com o hidróxido de cálcio e produzir gesso, gerando então um aumento de 100% do volume inicial do sólido. Alguns anos depois, LAWRENCE (1990), revisando sobre o assunto, apontou a existência de quatro reações entre os íons sulfato e os vários compostos hidratados, que são descritos abaixo. Serão trabalhadas mais a frente as três primeiras reações que são consideradas as mais importantes dos itens citados.

1. Reação dos íons sulfato com o aluminato tricálcico (C_3A) ou com o monossulfoaluminato hidratado de cálcio produzindo etringita.
2. Os íons sulfato podem reagir com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) cristalino, formando gesso.
3. Soluções de sulfato contendo magnésio como cátion podem reagir com o silicato hidratado de cálcio (CSH), liberando o cálcio por um mecanismo de substituição catiônica, que provoca o aparecimento de silicatos hidratados de magnésio de baixa resistência. O cálcio liberado é consumido na geração de gesso.
4. Formação da taumasita ($CaSiO_3.CaSO_4.CaCO_3.15H_2O$), pela quebra dos sistemas de silicato. Este fenômeno foi reportado somente em baixas temperaturas, por LUDWING e MEHR (1986), talvez porque as baixas temperaturas aumentem a solubilidade dos sais de cálcio. Como foi visto na composição da taumasita, em que para a sua formação exige a presença do carbonato de cálcio. A taumasita é normalmente encontrada dentro da fronteira de carbonatação do concreto.

Em paralelo com o evento da corrosão do concreto, os íons sulfato ainda podem se constituir como elementos agressivos à armadura. De acordo com ANDRADE (1992), ainda que os íons sulfato não tenham a mesma agressividade que os cloretos, porém eles também efetuam a ação despassivante, e devido a isso é necessário que seja determinado os seus teores no ambiente ao qual a peça estará exposta antes de definir o cobrimento da mesma. Em experimentos o efeito dos sulfatos associado com altas temperaturas, gerou um aumento de 7 vezes na taxa de corrosão da armadura.

2.4.3.2 Evolução do Ataque

De acordo com CALLEJA (1980), o desenvolvimento da agressão por sulfatos passa por dois estágios. O primeiro é o de natureza física, que se refere ao tempo de difusão dos sulfatos da solução para dentro da matriz do concreto. É um processo lento e depende principalmente das características de porosidade do concreto sob ataque. Assim sendo, os fatores que regem a porosidade do concreto são os que definem a taxa de agressão durante o período inicial do ataque. É afirmado ainda por LAWRENCE (1990) que, pelo fato da taxa de difusão do íon hidroxila (OH^-) ser muito superior comparado aos cátions correspondentes (Na^+ , Mg^{++} , etc.), o processo se aproxima ao de substituição da hidroxila pelo sulfato.

Continuando a explanação de CALLEJA (1980), o segundo estágio compreende a natureza química ao qual se insere o processo de reação entre os compostos hidratados da pasta, o íon sulfato e o cátion correspondente. A estrutura dos concretos neste estágio tende a sofrer degradações rápidas e violentas, e o conteúdo de C_3A começa a ser significativo. Entretanto não foi esclarecido o complexo mecanismo das reações envolvidas neste estágio, uma vez que os contraditórios resultados obtidos, induziam a conclusões diferentes, e normalmente opostas como também errôneas.

Pode ser exemplificado essa situação pelo fato de pesquisadores como, KALOUSEK e BENTON (1970) e MEHTA (1983), assinalarem que a quantidade de etringita formada não tem relacionamento direto com a expansão averiguada. E para tal, foram apresentadas duas razões para essa discrepância:

1. As primeiras quantidades de etringita formadas encontrariam espaço suficiente na rede de poros capilares para se depositar sem causar expansão e, de acordo com MOUKWA (1990), gerando uma densificação da matriz. Somente acima de um determinado valor que a formação de etringita passaria a se constituir em causa de expansão.
2. KALOUSEK e BANTON (1970), nos anos 70, indicavam a possibilidade da existência de dois tipos de etringita. De acordo com estes pesquisadores, nos cimentos Portland comuns (tipo I – classificação ASTM), a etringita se precipitaria sob forma de cristais, e o crescimento destes cristais em espaços confinados é que causaria expansão. Entretanto nos cimentos resistentes a

sulfatos (tipo V – classificação ASTM), a etringita se precipitaria e manteria a forma de um gel, não provocando expansão.

Essa questão é abordada por MEHTA (1983), que destaca que nos cimentos Portland comuns, com conteúdo de C_3A entre 6 e 12%, a etringita pode se formar duas vezes, uma durante os primeiros períodos de hidratação ($t < 24$ h), por causa do gesso adicionado ao clínquer, e outra quando os íons provenientes do meio conseguem penetrar na matriz hidratada, sendo que então a etringita se forma a partir da combinação dos íons cálcio, alumina, sulfato e hidroxila presentes na solução dos poros. A maneira como ocorre a cristalização nestes períodos, principalmente no segundo, é que determina o comportamento da etringita.

De acordo com MEHTA (1983), é conhecido que existem vários cristais de etringita e que a estrutura interna deles tem forma semelhante. No quesito da expansão, pode-se distinguir dois tipos: o tipo (1) de etringita, formado por grandes cristais de forma alongada e estreita, com comprimento entre 10 e 100 micrômetros e com muitos micrômetros de espessura, que são formados quando as concentrações de íons hidroxilas são baixas; e o tipo (2), formado por cristais de pequeno tamanho, com morfologia acúlea, com 1 ou 2 micrômetros de comprimento e 0,1 a 0,2 micrômetros de largura, sendo formados em condições de alta concentração de íons hidroxila, que normalmente é a condição existente nos concretos comuns.

Segundo FILHO (1994), a etringita tipo (1) é formada por cristais grandes e bem construídos, onde se deposita sem causar expansão, gerando até em um aumento de resistência. Já a etringita tipo (2), é formada por cristais muito pequenos e desordenados, sendo normalmente encontrado em grandes quantidades em corpos de prova fortemente atacados, indicando assim, que sua presença está atrelada com a expansão, devido provavelmente à elevada adsorção de água causada no estado de microcristalização. MEHTA (1983) cita que, são encontrados altos teores de etringita tipo (2) em estágios iniciais do ataque, no entanto, sem causar expansão. É demonstrado ainda pelo autor, que o efeito expansivo da etringita (2) possa ser melhor visualizado pelo entendimento do mecanismo seguinte:

1. Na fase inicial do ataque, quando existe a disponibilidade de hidróxido de cálcio e de aluminatos oriundos da hidratação do cimento, a solução dos poros apresenta abundância de íons Alumínio, Cálcio e Sulfato (principalmente por causa da solubilização do monossulfato produzido na hidratação). Sendo assim formado etringita tipo (2) em grandes quantidades.
2. Ao se diminuir o estoque de aluminatos, inicia-se a formação de gesso, ao invés de etringita.
3. Ao ser consumido o hidróxido com a contínua formação de gesso, inicia-se a situação em que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a etringita estarão rodeados por cristais de gesso, porém o pH da solução se reduz bastante.
4. Sendo assim, nessas condições, ocorre uma instabilização dos silicatos, que perdem rigidez, e ocorre a expansão, pela adsorção de água à etringita (2) ou pela sua conversão em etringita (1).

2.4.3.3 Intensidade do Ataque

Existe a possibilidade de ser dada de forma rigorosa a classificação da agressividade do meio ambiente, quando esta é baseada na concentração efetiva do agente agressor, e na forma indireta, quando se fundamenta somente nas condições de exposição ao qual o material está sujeito (HELENE, 1988). Será visto adiante as mais usuais formas rigorosas.

De acordo com FILHO (1994) é possível dizer que a intensidade do ataque selenitoso é dada principalmente pela quantidade de sulfato disponível no ambiente, como também na capacidade de manutenção deste suprimento. Pode ser medida a quantidade de sulfatos no solo, expressada em mg/kg, ou em meio aquoso, sendo expressa em mg/l, entretanto a concentração pode ser também dada pelo número de partes, em massa, de SO_3 por milhão (ppm).

As normas normalmente buscam encaixar os ambientes em categorias progressivamente agressivas, de acordo com o teor de íon sulfato presente. Ao se fazer a definição destas categorias de ambientes, as normas aderem uma posição prescritiva, mostrando os tipos de cimento a serem utilizados e, usualmente, valores

mínimos ou máximos para grandezas como a quantidade mínima de cimento ou a relação a/c. A partir da definição das condições limitantes, cada norma visa garantir que a produção de um concreto cumpra com as condições de impermeabilidade ou resistência química (FILHO, 1994).

É possível ver um resumo das classes de agressividade em função da quantidade de sulfatos definidas segundo algumas normas brasileiras e europeias na Tabela 11.

Tabela 11: Exemplos de classificação de agressividade do meio ambiente em função da concentração de íon sulfato presente no solo ou na água adotada por algumas normas.

Norma	Unidade	Nula	Fraca	Média	Forte	Muito Forte
Cembureau ² (1978)	mg/l	< 400	400-600	600-3000	3000-6000	> 6000
BRE Digest ² 250 (1986)	mg/l	< 360	360-1440	1440-3000	3000-6000	> 6000
	mg/kg	< 2400	2400-6000	6000-12000	12000-24000	
IS:456 ³ (1978)	mg/l	< 200	200-500	500-1000	1000-2000	> 2000
NEN 5996 ⁴	mg/l	< 200	200-600	600-3000	3000-6000	> 6000
CEB (1992)	mg/l	< 200	200-600	600-3000	3000-6000	> 6000
CETESB a L1.007 b c	mg/l	< 200	200-350	350-600	600-1200	> 1200
		< 250	250-400	400-700	700-1500	> 1500
		< 100	100-200	200-350	350-600	>600

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

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

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

Fonte: FILHO, 1994.

De acordo com as classificações adotadas pelas diversas normas, é possível concluir que as concentrações de íon sulfato relativamente tão baixas como 500 mg/litro já são consideradas comumente agressivas. Segundo LAWRENCE (1990), existe a possibilidade de admitir este valor como referência para classificar os ambientes não agressivos.

²Dados retirados de LAWRENCE (1990)

³Norma indiana "Indian Standard". Dados retirados de VINAYAKA (1986).

⁴Norma holandesa citada por BIJEN (1989).

Já para NEVILLE (1975), um ambiente é considerado moderadamente agressivo com uma concentração de 1000 mg/litro e um ambiente é muito severo para concentrações de 2000 mg/litro, principalmente se o componente principal for o sulfato de magnésio. Esses valores correspondem em torno de 0,2% e 0,5% de sulfatos solúveis no solo, respectivamente. KAYYALI (1989) relata que em determinados lugares, como por exemplo no golfo pérsico, as concentrações de sulfatos podem ser elevadas, chegando a valores que excedem o patamar de 2000 mg/litro, e não sendo difícil de encontrar valores acima de 5000 mg/litro.

De acordo com FILHO (1994) com o intuito de se evitar a degradação intensa do concreto, as normas geralmente exigem o uso de relações a/agl reduzidas e cimentos especiais nos ambientes contaminados. Com relação a quantidade de água, nota-se que é comum a exigência de relações a/agl próximos a 0,55 em ambientes de fraca agressividade, 0,50 para ambientes de média agressividade e 0,45 para ambientes de forte agressividade. Para MOUKWA (1990), concentrações de até 2000 mg/l é o bastante para que se obtenha uma estrutura densa, porém acima disto já é preciso o uso de cimentos especiais.

Ao se falar na utilização de cimentos especiais, FILHO (1994) menciona que o uso de cimentos com adição de cinza volante e escória é utilizado nas classes de fraca e média agressividade, enquanto nas classes de agressividade forte e muito forte é indicado a utilização de cimentos resistentes a sulfatos. Entretanto em ambientes de agressividade muito forte, com concentrações de íons sulfato superior a 6000 mg/l, é sugerido que seja feita uma proteção superficial no concreto, por meio de pintura ou de envolvimento numa membrana impermeável.

Para a definição do teor de sulfato contaminante em uma estrutura de concreto não existe uma norma brasileira específica, normalmente são adaptados os procedimentos propostos na NBR 5746 (1991), válida para o cimento, e na NBR 9917 (2009), que fornece o método de ensaio para determinação de cloretos e sulfatos solúveis em agregados.

2.4.4 – Formação de Etringita

Sulfoaluminato de cálcio hidratado, também conhecida como etringita, é um composto químico formado com base na presença de enxofre, alumínio, cálcio e água, normalmente em função do ataque de íons SO_4^{2-} . Este fenômeno ocorre no concreto

tanto nos primeiros instantes de hidratação, chamado etringita primária, como após o endurecimento do material, sendo então denominado de etringita secundária, ou DEF, conforme a literatura internacional.

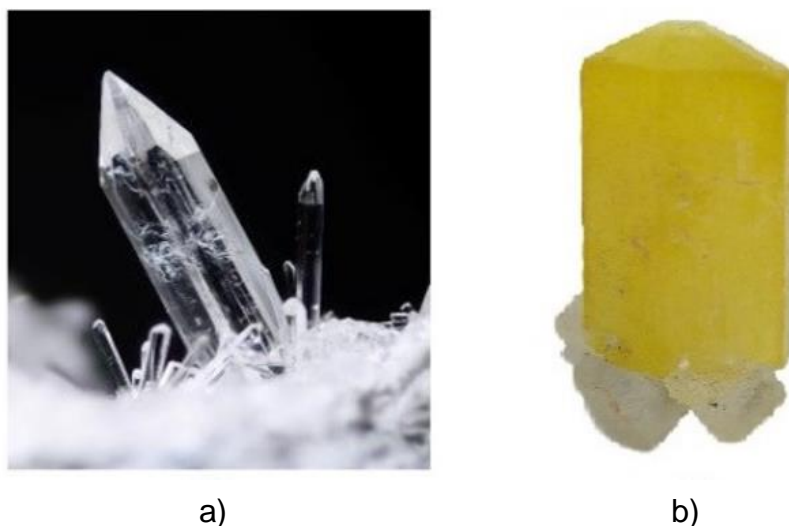
A etringita na forma tardia se descreve em uma manifestação patológica ao passo que provoca a expansão do concreto, promovendo a fissuração da pasta, o que pode levar à desagregação do material, com sintomas subsequentes.

A composição deste objeto químico é dada por $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, e seu processo de origem pode diferir em termos de formação primária ou secundária.

2.4.4.1 Mineral Etringita

De acordo com MATTOS (2017), o sulfoaluminato também pode ser encontrado em forma de mineral natural, apresentando morfologia de pequenos cristais prismáticos, com sistema trigonal, podendo ocorrer também em formato acicular, isto é, de agulha. Sua coloração é normalmente amarelo brilhante, incolor ou branca, conforme Figura 27 abaixo:

Figura 27: Mineral etringita. a) encontrado em Ettigen, na Alemanha; b) encontrado em Kuruman.



Fonte: MATTOS, 2017.

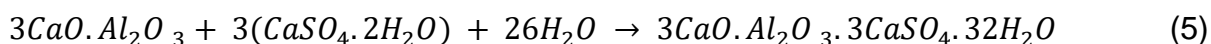
O mineral é bastante encontrado na Europa, em maior número de regiões na Itália e na Alemanha, especialmente no município de Ettigen, que deu origem ao nome da terminologia mineralógica. Existem ainda registros na América do Norte,

EUA, no sul da África, cidades de Kuruman, Hotazel e Black Rock e na Ásia, no Japão, em Israel, na Jordânia e na Palestina (MATTOS, 2017).

Com relação a composição química, o mineral etringita possui formulação indicada por $\text{Ca}_6\text{A}_{12}(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$. O material é ainda facilmente solúvel em ácidos diluídos e parcialmente solúvel em água, quando produz uma solução alcalina.

2.4.4.2 Etringita Primária

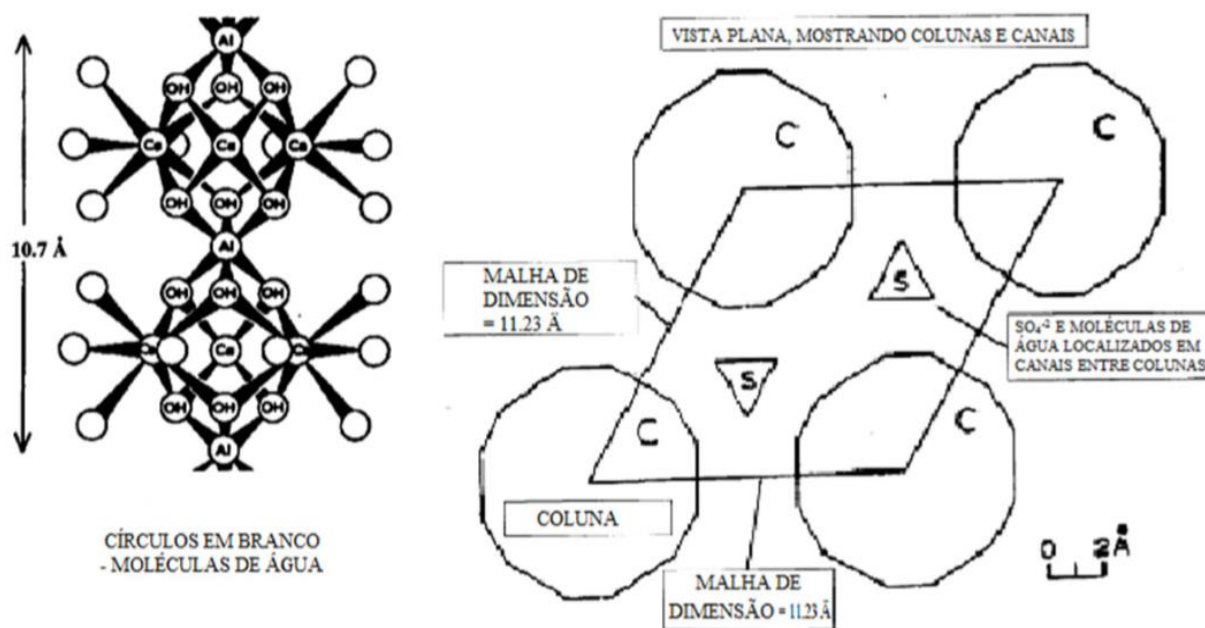
A primeira formação de etringita ocorre, pois, no início da hidratação do cimento, quando os sulfatos de cálcio dihidratados, ou os sulfatos solúveis no meio, interagem quimicamente, através de meio hidráulico, com os aluminatos tricálcicos disponíveis na matriz cimentícia, originando dessa forma o sulfoaluminato tricálcico hidratado, de acordo com a EQUAÇÃO (5), exibida abaixo.



Para TAYLOR (1997) e OLDER (2007), a formação de etringita primária tem início dentro dos primeiros instantes após o contato do cimento com a água, ainda no período de pré-indução. TAYLOR (1997) também menciona que os cristais de etringita produzidos nessa fase se apresentam com comprimento médio de 250 nm e 100 nm de espessura, sendo encontrados nas superfícies dos grãos de cimento ou próximos a eles. COLLEPARDI (2003) ainda acrescenta afirmando que na fase inicial a etringita não causa problemas de expansão devido à fluidez da pasta, ou seja, se formam enquanto o material ainda tem caráter plástico, sendo desta forma ainda flexível.

Este composto tem morfologia similar àquela apresentada para os minerais etringita, ou seja, sua estrutura química é prismática, baseada em colunas de matriz hexagonal, onde se encontram os íons de alumínio, cálcio, hidróxido e oxigênio. Nos canais, entre colunas, situam-se os íons sulfato e as moléculas de água presentes no composto conforme pode ser visto na Figura 28 abaixo:

Figura 28: Morfologia da etringita.



Fonte: MATTOS, 2017.

Um importante fator que deve-se analisar na formação da etringita primária é a sua estabilidade, química e térmica. Depois de seu desenvolvimento na fase inicial, o trissulfoaluminato pode sofrer interações químicas, formando novos compostos e, portanto, decompondo-se. É defendido ainda por alguns autores que, a elevadas temperaturas de cura, a etringita pode também não se formar ou se dissociar.

2.4.4.3 Etringita Secundária (DEF - *Delayed Ettringite Formation*)

Ela possui várias nomenclaturas, etringita tardia, etringita retardada, etringita secundária, ou ainda pela literatura internacional como DEF (Delayed Ettringite Formation), este composto químico apresenta, em geral, as mesmas características químicas que o seu antecessor, a etringita primária.

Certos estudiosos acreditam que o sulfoaluminato secundário é definido como aquele formado apenas por ataque interno, isto é, cuja fonte para formação do composto é da matriz cimentícia ou dos agregados grossos. Outros admitem que a etringita tardia é caracterizada por se formar no concreto em fase sólida, independente da origem do processo. Apesar desta discordância, é consenso que o composto se forma no concreto já endurecido.

De acordo com BORGES E SOUTO (2014) a formação tardia de etringita é um processo expansivo considerado como uma forma interna de ataque de sulfatos, ocorre quando a fonte de íons sulfatos é interna. Esta ocorre quando se tem uma inadequada temperatura de cura e/ou armazenamento de cimento. Resulta na remoção dos sulfatos inicialmente presentes na pasta de cimento. Ocasiona expansão de volume e desenvolvimento de fendilhação geral. Pode acontecer também quando se utiliza agregados contaminados com gipsita ou cimento com alto teor de sulfato. Segundo MEHTA e MONTEIRO (2008), a etringita formada por formação tardia é pouco cristalina. A cura de peças de concreto com temperaturas acima de 65°C pode induzir a formação de etringita tardia, porém, a etringita não é estável acima de 65°C, decompondo-se para formar o monossulfato hidratado. Uma representação diagramática para a formação de etringita tardia é apresentada na Figura 29:

Figura 29: Enfoque holístico para expansão e fissuração por formação de etringita tardia ou DEF (delayed ettringite formation).



Fonte: Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008.

De uma forma mais abrangente e objetivando definir os vários contextos em que se insere a etringita, segundo NORDINE (2008) *apud* MELO (2002), houve na França, no ano de 2002, o congresso RILEM – Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, que teve como objetivo estabelecer uma nomenclatura para a etringita. De acordo com Nordine, foram definidas quatro

categorias para o composto, a partir do momento em que se formam e do seu processo de formação no concreto:

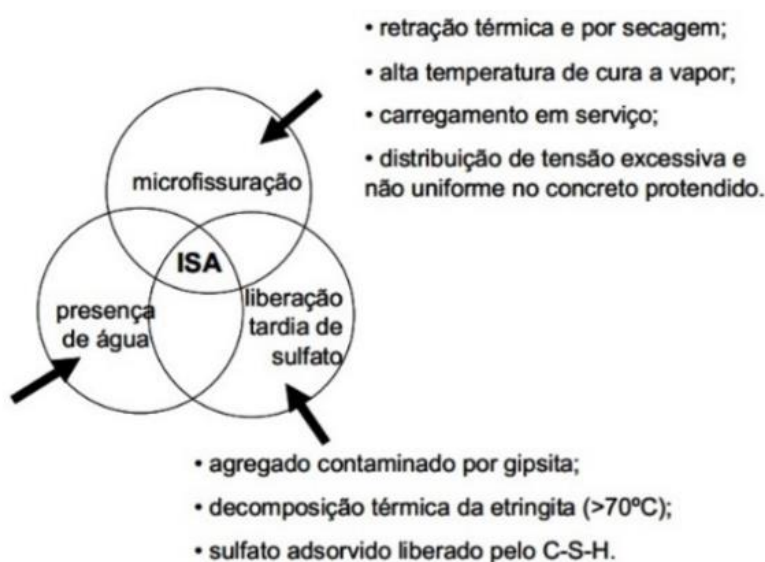
- Formação da etringita primária (precoce): resultante da hidratação do aluminato de cálcio na presença do gesso e que não causa expansão;
- Formação da etringita secundária (tardia): resultante de uma inserção de sulfato do meio externo ou de um excesso de sulfato interno (mais raro), que causa expansão pela formação massiva de etringita na pasta de cimento endurecida;
- Formação da etringita secundária (tardia): devida à recristalização da etringita (primária ou tardia) nos espaços vazios como poros, fissuras ou na interface pasta-agregado, a partir da solução intersticial. Este tipo de etringita não possui caráter expansivo, mas pode acompanhar outros fenômenos expansivos, no qual ela se dissolve e recristaliza nas fissuras formadas, aumentando a expansão;
- Formação da etringita tardia: consequente de altas temperaturas envolvidas. Ela se distingue das demais pelo seu complexo processo de formação, isto é, decomposição térmica (ou não formação) da etringita primária e (re)precipitação de microcristais de etringita na pasta de cimento hidratada, causando sua expansão e fissuração.

Assim sendo, de acordo com MATTOS (2017) ficam definidas as várias possibilidades de origem da etringita e assegurado que diferem no momento em que se formam e no processo que as determina. O trissulfoaluminato inicial é desenvolvido nas primeiras horas de vida do concreto por meio da reação entre o aluminato tricálcico e a gipsita; já a etringita secundária se forma após dias, meses ou até anos, quando o concreto já está em fase sólida, devido a fontes internas ou externas de sulfatos.

A formação da etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) no concreto, após o seu processo de cura, tem como condicionantes as presenças de íons SO_4^{2-} , Al^+ , Ca^+ e OH^- disponíveis para formar o composto. Neste contexto e considerando a fonte interna de sulfatos, COLLEPARDI (2003) defende, de acordo com o mecanismo de abordagem holística, a existência de três fatores (Figura 30) para a formação de etringita secundária:

1. O surgimento de microfissuras na matriz cimentícia – são necessárias para a deposição da etringita tardia na pasta de cimento e podem ser originadas por: a) ocorrência de reações sílica álcali (RSA); b) cura da pasta de cimento em altas temperaturas, excessiva taxa de aquecimento/resfriamento ou cura preliminar muito curta a baixa temperatura; c) efeitos de clima que impliquem em alternâncias de umidade/secagem ou aquecimento/resfriamento; d) carregamento do concreto em serviço; e) retração plástica devido a cura incompleta.
2. Liberação posterior de sulfato – necessária para o fornecimento de íons SO_4^{2-} , pode ocorrer em virtude de três processos distintos: a) a partir de agregados contaminados com gipsita, com partículas de sulfato de cálcio muito grossas, que não são disponibilizadas para a formação da etringita primária e passam a ser fonte para o desenvolvimento da secundária; b) decomposição térmica da etringita primária em concretos com superaquecimento; c) liberação lenta de íons sulfato adsorvido ao C-S-H em concretos curados a elevada temperatura.
3. Exposição à água – a presença deste líquido se faz importante ao passo que ele tem a função de transportar os íons sulfato, aluminato e cálcio pelos poros e microfissuras existentes na pasta.

Figura 30: Fatores intervenientes na formação de etringita secundária



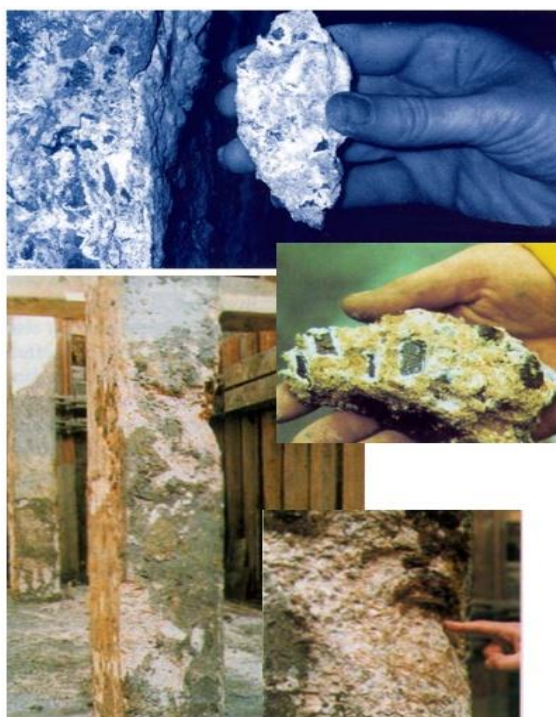
Fonte: COLLEPARDI, 2003.

2.4.5 Formação de Taumasita

Como já dito no tópico 2.4.3 (vide página 87, parágrafo 5º), a taumasita é outro produto do ataque de sulfatos, onde seu mecanismo de atuação nas estruturas de concreto pode ter um caráter severo. Entretanto para que ocorra esse ataque é necessário que haja na composição do concreto constituinte inadequada e que no ambiente contenha sulfatos nos solos. Para isso existem algumas estruturas que são mais passíveis ao ataque de sulfatos com formação da taumasita, tais como fundações e lajes de pavimento em contato com solos sulfatados, túneis, tubagens de esgotos, estradas, sub-bases, entre outros.

De acordo com COUTINHO (2001), nas décadas de 80 e 90 detectou-se no Reino Unido vários casos de degradação do concreto enterrado, onde sua matriz cimentícia foi substituída completamente por taumasita, tornando o concreto em um material mole, pastoso e sem coesão. Sua consequência é tão severa ao qual o resultado é um material friável que pode ser separado à mão, como demonstrado na Figura 31 a seguir.

Figura 31: Concreto sob o ataque de sulfatos com formação da taumasita.



Fonte: COUTINHO, 2001.

Tendo conhecimento que o ataque comum de sulfatos incide normalmente sobre o aluminato de cálcio hidratado C_3A e gera a formação de gesso e etringita, o ataque de sulfatos com formação de taumasita por outro lado se difere, uma vez que o composto atacado é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). E vale salientar que estes compostos são os principais agentes ligantes do cimento Portland como também dos cimentos resistentes aos sulfatos. E que a substituição de C-S-H por taumasita gera, como já citado anteriormente, a diminuição das propriedades ligantes do concreto com perda de resistência, como também a formação de um produto pastoso e sem coesão.

Para que o ataque ocorra e conduza a formação da taumasita faz-se necessário a disponibilidade de certos itens, tais como: íons sulfatos, íons carbonato, silicatos cálcicos ou silicatos cálcicos hidratados, umidade e água.

De acordo com COUTINHO (2001) uma fonte de íons carbonato é o calcário que se encontra presente no concreto utilizado em forma de agregado ou filler, porém existem situações ao qual o carbonato possa ser fornecido do exterior.

Obras como fundações executadas com agregado calcário e em solos com águas sulfatadas, são as mais propensas ao risco do ataque, uma vez que é visto a necessidade de uma fonte exterior de íons sulfato e água em boa quantidade.

É verificado que este mecanismo é bem mais grave que o conhecido pela formação de etringita, já que para a formação da taumasita realiza-se à custa C-S-H, que é o principal componente na contribuição da resistência do cimento Portland.

Em obras que estejam situadas em locais com alto teor de sulfatos no solo, é normal que seja especificado cimentos resistentes a sulfatos com teor de C_3A abaixo de 3,5%. Porém existem casos que mesmo ao se usar cimentos resistentes a sulfatos, o concreto fica vulnerável ao ataque de sulfatos desde que haja uma fonte de carbonato de cálcio, onde mesmo em situações onde este não se encontre finamente dividido, ou seja, apresentar partículas de grandes dimensões, podem chegar a gerar a formação da taumasita, principalmente quando em baixas temperaturas (PARKER, 1998).

Segundo COUTINHO (2001), a quantidade de silicatos de cálcio hidratados vulneráveis ao ataque por taumasite, é maior num cimento resistente a sulfatos do que um cimento Portland comum. E esses compostos (C-S-H), em situações de baixas temperaturas e alta umidade, reagem com os sulfatos advindos do exterior, como por exemplo o solo, e com os carbonatos, provenientes por exemplo dos agregados

calcários, formando-se então cristais translúcidos e moles de taumasite, que possui a composição química dada por:



De acordo com o organismo britânico BRE (British Research Establishment), no Reino Unido cerca de 40% do concreto possui agregados calcários em sua composição. Esse organismo menciona que o motivo ao qual o problema da taumasita ter sido tardiamente descoberto, foi pelo fato da resistência aos sulfatos ser tradicionalmente avaliado com base nos ensaios com agregados siliciosos e a temperaturas de 20°C pelo que antes era atribuído à formação de etringita a qualquer ataque de sulfatos (PARKER, 1998).

Desta forma, foi visto que a formação da taumasita requer uma fonte de carbonato de cálcio como exemplo o filler calcário usado nos cimentos modernos, e condições de temperaturas baixas. Estudou-se experimentalmente a formação da taumasita com cimentos com teores variados de C₃A e também com o mesmo tipo de cimento Portland, porém com teores de C₃A constantes, mas variadas porcentagens de filler calcário, entre 5 a 35%. Foi notado dessa forma, que a resistência aos sulfatos diminui com o aumento da porcentagem de filler calcário, principalmente com adições maiores que 10%, gerando então deteriorações bem mais rápidas. É verificado também que a resistência aos sulfatos diminui quando há o aumento de C₃A, e que concentrações de 0,14% a 1,8% de SO₄ nas soluções não influem nos resultados dos testes realizados.

2.4.6 Variáveis Intervenientes no Processo de Agressão

O CEB (1992) retrata quais os principais parâmetros que estão diretamente ligados à expansibilidade do concreto sob ataque de sulfatos, são eles:

- A permeabilidade do concreto, levando em conta que está diretamente relacionado a taxa de transporte de íons;
- As características do cimento e das adições, ou seja, seu nível de suscetibilidade;
- O volume de água disponível;
- A severidade do ataque, ou seja, os diferentes fatores que contribuem na exposição desse concreto.

Pode-se estabelecer uma classificação mais detalhada dos fatores influentes no desenvolvimento e evolução do ataque por sulfatos, dividindo em duas categorias (NEVILLE, 1975; CÁNOVAS, 1988):

- Fatores Endógenos (ou de produção): são os fatores relacionados com o processo de produção do concreto, como, dosagem, seleção de materiais, amassamento, cura. São eles:
 - O tipo de agregado (forma e granulometria; composição mineralógica);
 - O tipo de cimento (composição química e superfície específica);
 - A cura (duração; temperatura);
 - A dosagem (relação a/c; conteúdo de cimento; teor de argamassa).

- Fatores ambientais: são fatores relacionados com a origem dos sais, decorrentes do meio ambiente de inserção do concreto, são eles:
 - A temperatura da solução; A constância do fluxo de solução agressiva;
 - A concentração da solução agressiva.

Podemos destacar, nos fatores endógenos, o tipo de cimento, especificamente no que diz respeito à composição química. Lembrando de sempre limitar o conteúdo de C₃A, pois mesmo que a reação expansiva desse componente não seja a única a ocorrer durante o processo agressivo, ele continua sendo o fator de maior relevância, e que influencia na resistência do cimento portland comum ao ataque de sulfatos.

CÁNOVAS (1988) especifica as normas francesas, sugerindo que o teor de C₃A nunca ultrapasse 10%, principalmente em se tratando de obras em ambientes marinhos, o mesmo deve estar, normalmente, compreendido entre 6 e 8%. Para os cimentos resistentes a sulfato o teor de C₃A deve ficar entre 3 e 5%, medido pela fórmula de Bogue, conforme apresenta LAWRENCE (1990):

$$\% \text{C}_3\text{A} = (2.65 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1.692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Porém, ressalta-se que a presença de aluminatos é benéfica, principalmente quando possui cloretos no ambiente, isso se dá em função da capacidade dos mesmos em imobilizar o cloreto sobre a forma de cloroaluminatos. Uma das soluções para compensar esta carência de diminuição do C₃A é potencializar o conteúdo de C₄AF.

Um outro componente de importância não muito menor no processo de agressão vem sendo estudado, e é o C_3S . O estudo visa obter uma solução de poros com menor quantidade de íons de cálcio e hidroxila, isso favoreceria o surgimento de etringita não expansiva, diante disso debate-se a sobre a limitação na quantidade de C_3S , utilizando uma maior proporção de C_2S . IRASSAR E RODRIGUES estão trabalhando atualmente em uma pesquisa sobre este tópico na Argentina. LAWRENCE (1990) propõe a seguinte condição:

$$C_3A (\%) + 0.27 \cdot C_3S (\%) \leq 23.5\%$$

Durante a produção do concreto um outro fator crucial e que precisa ser levado em conta é o teor de sulfato incorporado, sendo que a norma inglesa BS 8110:1985 limita o mesmo a 4% da massa de cimento. Ou seja, a quantidade de sulfato que pode ser incorporado sem criar expansibilidade vai variar em decorrência de uma série de fatores como o conteúdo de C_3A , a temperatura de cura, a presença de cloretos e o tamanho médio das partículas de gesso adicionadas (LAWRENCE, 1990).

E é interessante que durante a dosagem, a definição da relação água/cimento, do teor de argamassa e da quantidade de cimento deve ser feita cautelosamente, buscando proporcionar condições para a produção de um concreto denso e com baixa porosidade, ou seja, que dificulte a permeação dos íons agressivos. CÁNOVAS (1988) demonstra útil a utilização da fórmula proposta por Lafuma para estabelecer a dosagem mínima de cimento, é ela:

$$C(\text{kg} / \text{m}^3) = \frac{k}{\sqrt[3]{D_{\text{máx}}}} \text{ com } k=700$$

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de Lisboa, aponta que o valor de k seja tido como variável, em decorrência da idade de exposição do concreto ao meio ambiente agressivo.

Algumas precauções devem ser tomadas visando à cura do concreto, logo, devem ser realizadas na medida do possível, prioritariamente em cimentos pozolânicos. O CEB aponta que essa cura seja conservada até que se alcance 70% da resistência característica especificada para a estrutura.

Segundo LAWRENCE (1990), essa cura a vapor sem pressão, não aumenta significativamente a resistência a ações dos sulfatos, exceto para traços com adição

de microssílica. Logo, o vapor com pressão proporciona um aumento a resistência, e isso se dá possivelmente ao efeito físico de densificação da matriz.

Em relação a agressividade da solução, imagina-se que, quanto maior for a quantidade de sulfatos dissolvidos potencialmente reativos maior é a agressão causada. Isso acontece em parte, justamente porque a reação é limitada pela presença dos reagentes oriundos dos compostos hidratados do concreto. LAWRENCE (1990), pontua que quando a concentração é superior a 0.5% de $MgSO_4$ ou de 1% de Na_2SO_4 a taxa de agressividade tende a se estabilizar.

Já em se tratando de temperatura de solução agressiva podemos afirmar que a mesma tem seu papel fundamental no processo, como evidencia KALOUSEK e BENTON (1970). LAWRENCE (1990), relata alguns experimentos onde é evidenciado que a expansão do concreto usualmente se reduz com a elevação da temperatura, isso se torna possível por conta do maior poder de dissolução da água, que reduz e reordena a cristalização de determinados produtos. O CEB (1992) menciona que a etringita é um elemento instável em temperaturas acima de $80^{\circ}C - 90^{\circ}C$ e que isso pode ser um dos motivos que justifica a diminuição da agressividade em climas quentes.

Quando falamos de manutenção do fluxo de sais agressivos compreendemos que é um fator determinante para o aumento da agressão. Entende-se que a deposição de cristais em águas em repouso é menor em decorrência do bloqueio ao acesso da solução, logo, o ataque também será menor, prioritariamente em caso de ataque com sulfato de magnésio (brucita).

2.4.7 Ensaio de Resistência a Sulfatos

Normalmente a avaliação da resistência de um concreto à ação do íon sulfato é feita por meio da observação do comportamento deste concreto quando exposto a uma solução agressiva que contenha sulfato de sódio ou magnésio. Porém, em alguns casos, existe a possibilidade da incorporação do sulfato à massa do corpo de prova durante a moldagem, como indica a ASTM C452 (1985). De certo, não há um teste padrão amplamente aceito para avaliar a resistência de um concreto à ação de sulfatos. Esta é uma razão pela qual dificulta geralmente a comparação de resultados experimentais obtidos.

Foi realizado uma revisão de ensaios por MEHTA e GJORV (1974), para avaliação da resistência à ação dos sulfatos e averiguaram que, mesmo com o grande número de procedimentos existentes, os mais utilizados não satisfaziam determinados pré-requisitos essenciais, tais como: fornecer resultados confiáveis num período curto de tempo; manter boa correlação com os dados obtidos de estruturas reais; ter aplicabilidade para a vasta gama de cimentos existentes, incluindo os que contém adições ativas.

O panorama não teve muita alteração, e de acordo com PRUDÊNCIO (1993), tem sido realizado estudos sobre agressividade dos sulfatos em vários países no decorrer destas últimas décadas, no entanto, os procedimentos de ensaio tiveram grandes variações, com diferenças desde a geometria dos corpos de prova até a forma de medição da resistência do material à degradação. Em geral, de acordo com as várias citações em bibliografias existentes, é possível dividir os testes em dois grupos:

- Testes de agressão por incorporação de sulfatos

Compreende no teste ao qual o agente agressivo, normalmente o sulfato de cálcio di-hidratado (gesso), é acrescentado durante o processo de fabricação do material. Assim sendo, o processo de agressão não passa pelo estágio inicial de natureza física, onde ocorre a penetração dos íons pelo meio externo e que depende de poros do material.

Um dos conhecidos testes foi proposto pela ASTM C452 (1985), onde prismas de 25x25x285 mm de argamassa eram preparados com a adição de gesso da forma que o conteúdo de SO_3 fosse de 7%, e imersos após um dia em água a 23°C, e com a expansão medida depois de 14 dias. De acordo com MEHTA e GJORV (1974), este é um método considerado útil para determinação dos cimentos potencialmente resistentes a sulfatos, com baixo teor de C_3A , porém não reproduz de forma convicta as condições reais, uma vez que a argamassa fica exposta à ação dos sulfatos desde a iniciação do processo de hidratação, quando a estrutura ainda não está bem formada. TALERO MORALES (1989) sugeriu a adoção de um maior conteúdo de SO_3 no decorrer do teste, garantindo que, desta maneira, poderia se expor com maior certeza opiniões sobre a resistência a sulfatos de cimentos pozolânicos. E de acordo com o estudo de vários teores o recomendado foi a utilização de 21% de SO_3 .

De acordo com FILHO (1994), outro teste que utiliza a adição dos íons sulfato durante a moldagem é apresentado por ANSTETT, que usa corpos de prova cilíndricos de 3 cm de diâmetro e 8 cm de altura para que sejam controladas suas expansões. A preparação dos corpos de prova é feita com uma mistura de 2 partes de pasta de cimento com 1 parte de gesso, sendo a expansão medida aos 28 e 90 dias. É proposto um critério de aceitação para o teste a obtenção de uma expansão abaixo de 1,25%. Porém este teste é considerado, de acordo com MEHTA e GJORV (1974), muito severo e pode produzir resultados não confiáveis para cimentos com adição de escória ou com baixos teores de C_3A .

- Testes de agressão por imersão em solução de sulfatos

Diferentemente do tipo de teste citado anteriormente, neste os corpos de prova são inseridos em uma solução agressiva contaminada com sais de sulfato, reproduzindo melhor as condições que realmente estarão submetidas as estruturas de concreto. Existe uma grande variação com relação a natureza e concentração dos sais utilizados para gerar a solução agressiva. A norma ASTM C1012 (1989), por meio da revisão dos procedimentos de ensaios existentes, indica a utilização de uma solução agressiva obtida pela diluição de 5% de sulfato de sódio, correspondendo a um teor de SO_3 de 2,8%.

De acordo com FILHO (1994), existe uma preocupação de vários autores em relação à exposição ao qual o corpo de prova estará submetido nos ensaios, se será com submersão parcial ou total. Entretanto, alguns autores mencionam que não há diferença significativa entre os dois tipos de situação. Porém alguns autores como MEHTA (1993), citam que a alternância de estado, com molhagens e secagens sucessivas, é uma geradora de forte degradação, devido a formação de cristais.

Em relação à monitoração da agressão resultante da ação dos sulfatos, os ensaios normalmente se baseiam no controle de dois parâmetros: as variações na resistência mecânica ou o aumento de dimensões decorrente da expansão característica deste processo de deterioração. Porém ainda existem ensaios que monitoram outros parâmetros, tais como o aumento de massa, a modificação da estrutura dos poros ou as modificações no módulo de elasticidade dinâmica. É verificado alguns casos onde é empregado apenas o controle visual da degradação. OUYANG *et al* (1988) apontam que uma diminuição de 40% no valor do módulo de elasticidade dinâmico poderia ser tomada como indicativo de falha devido à agressão

por sulfatos, já que corresponderia a uma expansão da ordem de 0,5%. Como uma maneira de complementar as informações sobre o processo agressivo é normal a realização de exames de microscopia eletrônica e de difração de raios-x para identificar corretamente a presença e a modificação, no decorrer do tempo, dos compostos presentes no corpo de prova, apresentando assim a ocorrência das reações químicas necessárias para que seja explicado estas transformações.

De acordo com MEHTA e GJORV (1974), deve-se dar preferência aos ensaios de controle de resistência em relação aos de expansão, pois são mais sensíveis a ambas características do ataque de sulfatos, seja a fragilização da superfície devido ao caráter ácido do ataque de sulfatos seja aos fenômenos de expansão/fissuração por causa da formação de compostos expansivos. No relevante aos ensaios de controle de resistência mecânica, há duas correntes de experimentos: os que controlam a evolução da resistência à compressão e os que preferem controlar a resistência à tração por flexão, garantindo que esta é mais suscetível às alterações deletérias na estrutura do concreto, ocasionadas pela presença dos íons sulfato.

KOCH e STAINEGGER (1960) propuseram um dos ensaios mais conhecidos no relevante a monitoração da resistência a flexão, chamado de Kock-Steinegger. É avaliado neste ensaio a variação na resistência à flexão de prismas de argamassa com dimensões 10x10x60 mm, confeccionados com um fator a/c de 0,6 e imersos numa solução de 4,4% de sulfato de sódio. Foi proposto por IRASSAR (1990) uma adaptação do método, em que foi definido um coeficiente de corrosão (R), que correlacionava a resistência à flexão dos corpos imersos na solução de sulfatos com a dos corpos imersos em água. Se o coeficiente R aos 56 dias de exposição fosse maior de 0,7, a amostra era considerada como resistente a sulfatos.

Segundo FILHO (1994), no intuito de simplificar os ensaios, houveram alguns casos que através da redução dos corpos de prova, utilizaram-se corpos de pasta de tamanho reduzido, o que diminuía a quantidade de material necessária, facilitava o manuseio e maximizava a agressão. Este procedimento permitia que, devido à elevada relação superfície/volume, fossem obtidas agressões significativas em idades menores que as necessárias para corpos de prova de concreto de maiores dimensões.

De acordo com KAYYALI (1989), a falta das interfaces pasta agregado miúdo/grauído, a agressão em corpos de prova de pasta ou argamassa não devem ser tão elevada quanto a existente em corpos de prova de concreto. Esta exposição

estaria fundada no fato de que a interface ou zona de transição se constituiria na parte mais suscetível à deterioração, devido à presença abundante de água e à alta concentração de cristais de hidróxido de cálcio, formados com mais facilidade nas zonas onde existe mais espaço livre. No entanto, deve-se considerar que o tamanho reduzido dos corpos de prova de pasta ou argamassa estabelece uma relação superfície/volume bastante elevada, fazendo com que os efeitos da agressão sejam maximizados.

O Mehta Test, apresentado por MEHTA e GJORV (1974) foi um dos testes mais conhecidos com corpos de prova de pasta. Inicialmente dentro da proposta envolvia a confecção de corpos de prova de pasta cúbicos com 12,5 mm de aresta e relação a/c 0,5. Para a realização deste teste, os corpos devem ser colocados num ambiente úmido com temperatura de 50°C por sete dias, de maneira a acelerar a cura e garantir que antes da imersão a pasta se encontre adequadamente hidratada. A imersão é realizada em uma solução de 4% de Sulfato de Sódio, garantindo um teor de SO₃ de 2,1%.

São submetidos os corpos de prova ao ensaio de resistência à compressão após 14 e 28 dias de imersão. De acordo com PRUDÊNCIO (1993) o teste também foi usado para testar cimentos com adição de escória, porém, com diferenças no procedimento de cura. O critério utilizado para considerar um cimento como resistente a sulfatos foi a obtenção de uma diminuição de resistência menor que 20%.

Existem outras configurações de ensaios com corpos de prova de pasta que são utilizadas, com diferenças nas dimensões, composição da solução agressiva, tempo de cura ou de exposição, etc. Um exemplo é o caso do trabalho relatado por KALOUSEK e BENTON (1970), que fizeram uma investigação com corpos de prova de pasta prismáticos e cilíndricos expostos a soluções de 10% de sulfato de sódio e 1,8% de sulfato de magnésio.

2.4.8 Medidas de Proteção contra o Ataque de Sulfatos

Algumas medidas podem e devem ser tomadas evitando ou diminuindo o problema da agressão por sulfatos, medidas essas que devem ser empregadas sobre os parâmetros que governam todo o processo.

Uma sugestão seria a diminuição da agressividade do ambiente através da redução da quantidade de íons agressivos ou de água disponível que possibilite essa

agressão, entretanto esse controle é normalmente impraticável. Uma opção também discutida seria a modificação das características do concreto, tornando-o menos suscetível a degradação, porém, nesse caso seria necessária a utilização de um cimento com baixo teor de C_3A ou a incorporação de adições. Pode-se procurar retardar as condições de acesso do agente agressor ao concreto, buscando isolar o material do ambiente agressivo ou torná-lo impermeável. As possíveis medidas poderiam ser a utilização de uma impermeabilização ou a realização de uma cura cuidadosa no intuito de reduzir a permeabilidade do concreto.

O CEB (1992) sugere inúmeras medidas referentes a cada nível de agressão sofrido pelo meio ambiente, como citado na Tabela 12. Verificando-a, percebe-se que sempre é sugerida a utilização de um cimento resistente a sulfatos para melhorar a resistência aos mesmos, no entanto, como já foi mencionado, o uso de um cimento com adições pode substituir, sem perda de desempenho, o cimento resistente a sulfatos.

Um ponto importante, para ataques severos, o CEB não indica nenhum tratamento, admitindo que a degradação vá ser muito forte. Desta maneira, a medida proporcionaria o melhor efeito seria a impermeabilização, como vai ser discutido logo mais.

Tabela 12 – Recomendações para incrementar a resistência do concreto ao ataque de sulfatos

Grau de Severidade do Ataque	Mecanismo de proteção	Medidas de proteção a adotar
Fraco	Permeabilidade Redução relação a/agl Proteção superficial Tipo de cimento	Penetração de água \leq 50 mm Inferior a 0.6 Pintura protetora Cimento resistente a sulfatos
Moderado	Permeabilidade Redução relação a/agl Proteção superficial Tipo de cimento	Penetração de água < 30 mm Inferior a 0.5 Pintura protetora Cimento resistente a sulfatos
Forte	Permeabilidade Redução relação a/agl Proteção superficial Tipo de cimento	Penetração de água mínima Inferior a 0.4 Pintura protetora Cimento resistente a sulfatos
Muito Forte	-	proteção superficial

Fonte: CEB, 1992.

- **Bloqueio do acesso dos íons**

Conforme o que foi mencionado acima compreendemos que a melhor maneira de enfrentar um ambiente contaminado com sulfatos é produzindo um concreto de qualidade, que possua alta compacidade, bem curado e bem misturado. Dessa forma um concreto produzido com baixo fator a/c e com corretos procedimentos de dosagem, mistura e amassamento, dificultará o acesso dos íons sulfatos do meio circundante, reduzindo drasticamente a agressão resultante.

A cura a vapor sob pressão pode ser utilizada também, e com bons resultados, pois atua na transformação do hidróxido de cálcio provocando a criação de silicatos e aluminatos mais estáveis. Porém, é necessário ter muita cautela para evitar a fissuração de origem térmica, pois prejudica de forma decisiva o desempenho do material. A cura a vapor sem pressão não provoca melhorias, sendo em muitos casos até prejudicial por causa do surgimento de fissuração.

A utilização de uma película impermeável, sob forma de uma pintura ou de um hidrofugante também seria outra forma de bloqueio (ASLAM et al, 1987). Essa proteção se torna importante principalmente em ambientes muito agressivos, onde é necessário impedir o contato do concreto com esse meio. BIJEN (1989) classifica os tratamentos superficiais protetores em quatro tipos, são eles:

- Impregnação com hidrofugante - neste caso as paredes dos poros são impregnadas com um agente repelente de água, através de um procedimento de secagem e sucção. Em sua maioria são utilizados Silanos, Siloxanos ou Resinas a base de silicone. Esse tipo de tratamento reduz bastante a absorção, pois dificulta a sucção capilar, mas não tem efeito sobre a difusão de gases, como o vapor de água.
- Impregnação com preenchimento parcial dos poros - neste caso a superfície do concreto é pintada com um agente que penetra nos poros, usualmente por absorção. Em alguns casos o agente pode reagir quimicamente com os compostos do concreto. São utilizados Silicatos de Sódio ou Potássio dissolvidos em água, ésteres de Silício e Fluorsilicatos, além de polímeros como o polimetilmetacrilato.
- Impregnação com preenchimento total dos poros (Selamento) – Semelhante ao anterior, porém com bloqueio completo dos poros superficiais.

- Aplicação de camada superficial de proteção – Neste caso a proteção se dá através da formação de uma barreira superficial contínua. Neste grupo se incluem as películas de tinta convencional e, especificamente, as tintas de baixa permeabilidade, à base de epóxi, poliuretano, polimetilmetacrilato, etc. Em alguns casos pode-se fazer uso de argamassa especial.

Os principais pontos negativos em se tratando da utilização de tratamentos superficiais estão relacionados à manutenção do seu desempenho, como já foi mencionado. A ação dos raios ultra-violeta, a oxidação, o bloqueio de água no interior do concreto, a falta de compatibilidade com o substrato, a presença de defeitos na continuidade da película, tudo é um possível fator que pode comprometer o desempenho destes tipos de tratamento (BIJEN, 1989). Desse modo, é recomendável, mesmo nos casos em que se pretende utilizar uma proteção, obter um concreto de alta compactidade e baixa permeabilidade. Para isso, dentre as formas existentes, aquela que atinge este objetivo, é a que faz uso de adições ativas, que modifica a estrutura do material.

- **Modificação do concreto através do uso de adições**

Os efeitos positivos da adição de pozolanas na redução do ataque selenitoso podem ser (IRASSAR, 1990):

- Diminuição relativa do conteúdo de C_3A , devido à redução na quantidade de clínquer;
- Remoção do hidróxido de cálcio pela formação de CSH secundário devido ao efeito pozolânico;
- Decréscimo da porosidade acarretada pela formação secundária de CSH nos poros, o que dificulta a movimentação da água e dos íons, protegendo os compostos que são suscetíveis a instabilidade em ambientes sulfatados;
- Favorecimento da formação de etringita na solução dos poros, sem expansão.

Segundo WOODS (1968) e KALOUSEK (1970), existem evidências conflitantes sobre o uso de pozolana, sendo que algumas adições utilizadas em ensaios não mostram desempenho significativo no combate a agressão por sulfatos. Apesar dos benefícios citados anteriormente, nem sempre o uso de adições

pozolânicas deve ser considerada positiva. WOODS cita um experimento onde a utilização de pozolanas de alta qualidade (25% do material cimentante) produziu um enorme acréscimo na resistência a sulfatos dos corpos de prova elaborados com cimentos contendo alto teor de C_3A , sem melhorar o desempenho de corpos com baixo teor de C_3A .

Uma justificativa para esse comportamento seria a de que a incorporação de adições provocou um aumento na sucção capilar, devido ao refinamento dos poros, o que pode ter acarretado em um maior ingresso de íons sulfato e potencializado uma maior agressão.

Segundo LAWRENCE (1990), os cimentos com escória granulada de alto forno sempre foram considerados aptos para utilização em ambientes selenitosos. Esse tipo de cimento composto é caracterizado pela alta estabilidade, no entanto alguns testes realizados indicam resultados insatisfatórios. O autor acredita que esses resultados podem ser atribuídos à baixa hidraulicidade das escórias utilizadas ou ainda a inadequada escolha do clínquer. Porém foi constatado que é necessário o uso de uma elevada quantidade de escória para obter bons resultados, normalmente com teores maiores que 40%.

As matrizes de concreto originadas pela incorporação de microssílica ou de cinza de casca de arroz apresentam uma estrutura menos porosa, e por isso, mais impermeável, o que diminui a chance de ataque (CALLEJA, 1986).

FILHO (1994), cita que o concreto m.s., em contraste com o concreto sem adições, é caracterizado pela criação de um gel de C-S-H denso e compacto, que não pode ser visualizado como partículas individuais. Logo, os cristais de hidróxido de cálcio, além de parcialmente transformados em C-S-H secundário, também se modificam, passando a surgir cristais pequenos e disseminados, ao invés de cristais grandes e localizados característicos dos concretos convencionais e que funcionam como imperfeições ou descontinuidade da microestrutura. Modificações estas que vão proporcionar em melhorias também na zona de transição entre a pasta e o agregado, com impactos diretos na estrutura dos poros, nas possibilidades de acesso dos fluidos e, portanto, na resistência química do concreto.

É importante reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio, isso pode ser conseguido através da introdução de adições pozolânicas, e que contribui para evitar efeitos deletérios do ataque selenitoso, pois a mudança do hidróxido em gesso fica minorada (KAYYALI, 1989). ELLIS (1992) apresenta dados que mostram a

divergência entre a cinza volante com alto teor de cálcio (tipo C) e a com baixo teor (tipo F), considerando então que, enquanto a primeira pode ocasionar uma diminuição da resistência à sulfatos pela presença de aluminatos de cálcio a segunda provoca uma melhoria da mesma. O autor ainda salienta que o uso da cinza com reduzido teor de cálcio parece provocar melhores efeitos quando em grande quantidade. Já a cinza com alto teor de cálcio não deve ser utilizada em proporções acima de 25% do material cimentante total, pois pode levar a problemas de pega no concreto.

É considerado então, que mesmo com algumas divergências, pode-se colocar com segurança que a união adequada de adições com cimentos especiais pode ser formada como uma excelente alternativa para a confecção de concretos com alta resistência a ação deletéria dos íons sulfatos. LAWRENCE (1990) acrescenta relatando que o BRE digest 250 recomenda, para incrementar a resistência a sulfatos, que sejam adicionadas 25% de cinza volante ou 70% de escória granulada. O mesmo evidencia que na França e na Alemanha, os cimentos supersulfatados ou com adição elevada de escória são considerados como equivalentes ao cimento resistente a sulfatos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das patologias ocorrentes em estruturas de concreto armado é de suma importância para que a vida útil definida em projeto seja seguida e que sejam evitadas assim interferências extremas. A durabilidade e o desempenho dos produtos e sistemas, construídos e em desenvolvimento, tem se tornado questões preocupantes em vários setores da construção civil, e para isso, os estudos e pesquisas se tornam mais intensos acerca das manifestações patológicas e da durabilidade das estruturas. Para isso ao se verificar os efeitos degradantes, suas causas e consequências, é essencial que conceitos como o de durabilidade sejam postos em prática e estruturas possam se manter em serviço.

Mesmo com estudos, pesquisas e o conseqüente acúmulo de conhecimento, diversos fatores têm sido presenciados nas construções que implicam na perda da durabilidade e qualidade das obras correntes. Para isso a verificação das experiências coletadas em trabalhos de pesquisa passados e atuais, nos leva a instaurar um novo nível de conhecimento, como também, apresentar as falhas neles contidas, fazendo com que desta forma, os casos com problemas não resolvidos sejam visados com mais atenção, buscando assim, o interesse para um melhor entendimento onde muitas vezes, suas soluções, possam servir para certos propósitos tecnológicos.

Importância do estudo, do incentivo ao desenvolvimento de novos ensaios e testes referentes ao ataque de sulfatos. Visto a necessidade de maiores pesquisas para a criação de novas formas e materiais mais econômicos e sustentáveis e de melhor rendimento para a proteção do concreto em ambientes susceptíveis a ataque de sulfatos.

Ao longo do trabalho foram vistos conceitos, equações de reações, estudos, trabalhos, pesquisas e ensaios realizados no âmbito do concreto e nas reações patológicas com foco no ataque de sulfatos, para que assim fossem discriminadas e expostas as melhores formas já existente de prevenção e recuperação para as estruturas atacadas por esses agentes deletérios.

Sabe-se que não existe ensaio com resultado 100% preciso, e que nem todas as formas de prevenção e proteção contra o ataque de sulfatos são totalmente eficazes. Visto a importância do concreto armado na sociedade atual, como sendo quiçá o principal produto mais utilizado nas estruturas em todo o mundo, e que em determinadas regiões apresentam agentes degradantes, como por exemplo, o íon

sulfato. É necessário sempre uma reciclagem e um aprimoramento nos ensaios, testes, e pesquisas de novas formas de proteção ao concreto.

Infelizmente a escassez de recursos, como à falta, principalmente, de laboratórios e equipamentos adequados para realização de ensaios específicos, por não estarem disponíveis quando dado início a referente pesquisa, como também a falta de tempo necessário para realização dos ensaios e levantamentos experimentais acabaram por resultar em uma pesquisa com um abrangente engajamento teórico, contudo, carente em características práticas e experimentais. No entanto, o trabalho deverá ser continuado, buscando comprovar em bases experimentais o que nele foi apresentado, com objetivos de conhecimento mais estreito do efeito dos sulfatos ao concreto e, com isto, inferir dados que possam auxiliar na prevenção e controle do ataque de sulfatos ao concreto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, J. E. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ALIZADEH, R. **Cement and Art**. Ottawa: INSTITUTE FOR RESEARCH IN CONSTRUCTION. Disponível em: <<http://www.cementlab.com/cement-art.htm>>. Acesso em: 26/08/2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Potential Expansion of Portland cement mortar exposed to sulfate**. ASTM C452. Philadelphia, 1985.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution**. ASTM C1012. Philadelphia, 1989.

ANDRADE, M. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. Tradução e Adaptação: Carmona, A e Helene, P. São Paulo, Ed. PINI, 1992.

ARAÚJO, A. *et al.*, **Monitoramento da corrosão em estruturas de concreto: sensor de umidade, de taxa de corrosão e de fibra óptica**. São Paulo: Técnica 195, 2013.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. das G. A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Seropédica, Editora Universidade Rural, 2000.

ASLAM, M.; SRIVASTAVA, R. S.; MINOCHA, A. K. Durability of Concrete in Sulphurous Atmosphere. Indian Concrete Journal, May, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5746**: Cimento Portland – Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 1991.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9917**: Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.

BATTAGIN, A. F. **Cuidados ao construir em áreas litorâneas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/cuidados-ao-construir-em-areaslitoraneas>>. Acesso em: 15/08/19.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. v. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.

- BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. v. 2. ed .Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- BERTOLINI, L. **Materiais de construção**. São Paulo: Oficina de texto. 2010.
- BIJEN, J. M. Maintenance and Repair of Concrete Structures. In: Heron, v.34, n.2. Delft, 1989.
- BORGES, F. L.; SOTO, R. C. **Deterioração química e biológica do concreto**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- CALLEJA, M. - **Durability of Concrete**. In.: Intl. Cong. Chem. Cem., 7th. Paris, 1980 – **Future Trends in the research of the Structure, Properties and Behaviour of Blended Cements**. In: Intl. Cong. Chem. Cem, 8th. Rio de Janeiro, 1986.
- CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo. Ed. PINI, 1988.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 01/09/2019.
- CLARKE, J. N. **Testing Concrete Durability – the Work of the Concrete Society**. In: Concrete, Janeiro, 1986.
- COLLEPARDI, M. **A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete**. Cement and concrete research, 2003.
- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON (CEB) – Durable Concrete Structures CEB Desing Guide. Bulletin D’information 183. Paris, 1992.
- CORROSÃO NA ARMADURA DE UMA VIGA**. Disponível em: <<https://plugin.grupohct.com.br/tag/corrosao-em-armaduras-de-concreto/>> Acesso em 04/09/2019.
- CORSINI, R. **Trinca ou fissura?**. São Paulo: Técnica. 160, p., jul. de 2010. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/160/trinca-ou-fissura-como-se-originam-quais-os-tipos-285488-1.aspx>>. Acesso em 01/09/2019.
- COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.
- COUTINHO, J. S. **Ataque por sulfatos**. Durabilidade – FEUP, Porto, Portugal, 2001.
- COUTINHO, J. S. **Ataque por sulfatos**. FEUP, 2001. Disponível em: <http://www.deecc.ufc.br/Download/TB819_Patologia_e_Recuperacao_de_Estrutura_s_de_Concreto/ATAKSulfato.pdf> Acesso em 06/08/2019.
- CRISTAIS DE SILICATO DE CÁLCIO HIDRATADO (C-S-H)**. Disponível em: <<http://www.ipc.org.es>> Acesso em 04/08/2019.

CUSTÓDIO, M. A. **Estrutura Interna do Concreto**. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17310/material/05%20-%20Estrutura%20Interna%20do%20Concreto.pdf>> Acesso em 05/08/2019.

DEGRADAÇÃO QUÍMICA NO CONCRETO POR LIXIVIAÇÃO. Disponível em: <<https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-lixiviacao.html>> Acesso em 04/09/2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 090-ES: Patologias do concreto – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

ELLIS, W. E. **For Durable Concrete, Fly Ash does not “Replace” Cement**. In: *Concr. Int.*, v.14, n.7. Jul., 1992.

FILHO, L. C. P. S. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

FISSURAS INTERCONECTADAS EM LAJE DE CONCRETO. Disponível em: <<https://www.atex.com.br/blog/materiais/5-problemas-comuns-em-estruturas-de-concreto-e-como-evita-los/>> Acesso em 04/09/2019.

FLEXÃO EXCESSIVA EM VIGA. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/ELS_NBR6118.pdf> Acesso em 04/09/2019.

GARCIA, C. C. **Incidências patológicas no subsistema estrutura de edifícios habitacionais na região de São Carlos/SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

GLÓRIA, R. M. **Estudo dos processos de formação, acumulação, emissão e oxidação de sulfeto de hidrogênio em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. 65 f. Dissertação (Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

GOSTELOW, P. et al. **Odour measurements for sewage treatment works**. *Water Research*, Bedford, n. 3, v. 35, p. 579-597, 2001.

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

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

HELENE, P. R. L. Durabilidade do concreto versus agressividade do meio. In: *Tecnologia de Edificações*. São Paulo, Ed. PINI, 1988.

HELENE, P. R. L. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1992.

HELENE, P. R. L.; ANDRADE, J. J. O.; MEDEIROS, N. H. F. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. Edição IBRACON/ Geraldo C. Isaia, 2011

IRASSAR, F. Sulfate Resistance of Blended Cement: Prediction and Relation with Flexural Strength. *Cem. Concr. Res.*, v.1, 1990.

KALOUSEK, G. L.; BENTON, E. J. Mechanism of Seawater Attack on Cement Pastes. In: *ACI Journal*, Feb. 1970.

KAYYALI, O. A. **Porosity and Compressive Strength of Cement Paste in Sulphate Solution**. *Cem. Concr. Res.*, v. 19, 1989.

KOCH, A.; STEINEGGER, H. – **Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff**. In: *Zement-Kalk-Gips*, n.7, Jul., 1960.

KOHL, M. A. *et al.* **ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE EM CONCRETOS COM E SEM ADIÇÃO DE PRODUTOS DE PROTEÇÃO**. UNISC: Universidade de Santa Cruz do Sul, 2017. Disponível em: <<https://online.unisc.br/acadnet/anais/index.php/semic/article/view/17567>>. Acesso em: 28/08/2019.

KULISCH, D. **Ataque por sulfatos em estruturas de concreto**. 109 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LAWRENCE, C. D. Sulphate Attack on Concrete. *Mag. Concr. Res.*, n.153, Dec. 1990.

LIMA, M. G. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. 1 v.

LUDWIG, U.; MEHR, S. **Destruction of Historical Buildings by the Formation of Ettringite or Thaumasite**, In: *Int. Cong. Chem. Cem.*, 8th, Rio de Janeiro, 1986.

MACHAS SUPERFICIAIS NO CONCRETO DEVIDO À CORROSÃO DE ARMADURAS POR PRESENÇA DE UMIDADE. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Thiagoo0000/patologia-das-estruturas-piso-concreto-e-revestimentos>> Acesso em 04/09/2019.

MATTOS, P. M. F. **Durabilidade do betão auto-compactável de elevado desempenho face ao ataque químico**. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, João Pessoa, 2017.

MATTOS, P. M. F. **Patologia estrutural em duas obras da UFPB e soluções de recuperação e reforço**. 143 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

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

MEHTA, P. K. Durability of concrete-Fifty years of progress?. In: *Seminário sobre qualidade e durabilidade das estruturas de concreto*. Porto Alegre, Dez 1993.

MEHTA, P. K. **Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete – Another Look**. *Cem. Concr. Res.*, v.13, 1983.

MEHTA, P. K.; GJORV, O. E. **A new test for sulfate resistance**. In: Journal of Testing and Evaluation, v.2, n.6. Nov. 1974.

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

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2002.

METCALF; EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em água para consumo humano**. Ministério da Saúde: Fundação Nacional de Saúde. Brasília, 2003.

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

MOUKWA, M. **Characteristics of the Attack of Cement Paste by $MgSO_4$ and $MgCl_2$ from the Pore Structure Measurements**. In: Cem. Concr. Res. v.20, 1990

MOURA, P. G. T. **Notas de aula da disciplina Patologia das estruturas**, ministrada pelo professor e engenheiro civil Paulo Germano Toscano Moura. João Pessoa, Paraíba: Universidade Federal da Paraíba, 2019.

NAKAMURA J. **Vazios de concretagem põem em risco desempenho de estruturas de concreto armado**. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/vazios-de-concretagem-poem-em-risco-desempenho-de-estruturas-de-concreto-armado_14605_10_0> Acesso em 04/09/2019.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Ed. Pitman Pub. Ltd. 2ª Edição, revista. 687 p. Londres, 1975.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de: GIAMMUSSO, S. E. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NINHO DE CONCRETAGEM DE UMA VIGA, ORIGINALMENTE ENCOBERTO POR CONCRETO QUE NÃO PENETROU ENTRE A FÔRMA E AS ARMADURAS. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Thiagoooooo/patologia-das-estruturas-piso-concreto-e-revestimentos>> Acesso em 04/09/2019.

ODLER, I. **Hydration, setting and hardening of Portland cement**. Lea's chemistry of cement and concrete. Elsevier: Butterworth Heinemann, China, 2007.

OUYANG, C.; NANNI, A.; CHANG, W. F. **Internal and External Sources of Sulfate Ions in Portland Cement Mortar: Two Types of Chemical Attack**. Cem. Concr. Res., v.18, 1988.

PARKER, D. **Sulphate attack his M5 bridges**. New Civil Engineer, 2 April, 1998.

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

PERRY, R.; SLATER, D. H. Poluição do Ar. In: Química e Poluição / F. R. Benn e C.A. MacAuliffe (coord.) Trad. L. R. M. Pitombo e S. Massaro. Ed. Universidade São Paulo. São Paulo, 1981.

PILAR COM FERRAGENS EXPOSTAS (NINHOS DE CONCRETAGEM) APÓS A CONCRETAGEM DEVIDO A FALHAS NO PROCESSO DE ADENSAMENTO DO CONCRETO. Disponível em: <<https://construcaocivil.info/pilar-com-ferragens-expostas-ninhos-de-concretagem-apos-a-concretagem-por-conta-de-falhas-no-processo-de-adensamento-do-concreto-ferramenta-utilizada-para-adensamento-vibrador-de-imersao-obra-e/>> Acesso em 04/09/2019.

PINHEIRO-ALVES, M. T.; GOMÀ, F.; JALALI, S. **Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos**. Congresso Construção 2007 – 3º Congresso Nacional. 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, jul./set. 2007.

PRUDÊNCIO. JR., L. R. **Durabilidade do Concreto frente ao Ataque de Sulfatos e Cloretos**. In: Seminário sobre a Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto. Porto Alegre, 1993.

REZENDE, L. V. S. *et al* (1996). **Resistência do concreto dosado em central – classificação e aspectos de durabilidade**. Congresso técnico-científico de Engenharia Civil. Abril. Florianópolis, 1996.

SANTHANAM, M; COHEN, M. D.; OLEK, J. **Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2. Proposed mechanisms**. Cement and Concrete Research, n. 33, p.341-346, 2003.

SARTI, A. *et al*. **Remoção de sulfato de águas residuárias industriais em reator anaeróbio de leito fixo operado em bateladas sequenciais**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, vol.13, n.1, p. 15-22, jan./mar. 2008.

SILVA, T. S. S. da. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e esgoto**. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Fundação Oswaldo Cruz - Escola Nacional de Saúde Pública. Rio de Janeiro, 1999.

SOTANA, A.; BAMBERG, E. C.; COSTA, T. B. **Patologia das estruturas, pisos de concreto e dos revestimentos**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/Thiagoooooo/patologia-das-estruturas-piso-concreto-e-revestimentos>> Acesso em 04/09/2019.

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

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

TALERO MORALES, R. **The sulfate Resistant Portland Cement, are not the Ultimate Answer to the Problem of Sulfate Attack**. In: Int. Cong. Chem. Cem. 8th. Rio de Janeiro 1989.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. Thomas Telford, 2ª edição, Londres, Inglaterra, 1997.

TRINCA EM ESTRUTURA DE CONCRETO. Disponível em: <<https://www.plantasdecasas.com/8-fatores-que-causam-rachaduras-e-fissuras-concreto/>> Acesso em 04/09/2019.

WOODS, H. **Durability of Concrete Construction**. ACI Monograph nº4. Detroit, 1968.