

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Especialização: Produção e Gestão do
Ambiente Construído

Tássia Dias Figueredo

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS POR
ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO CONCRETO

Belo Horizonte,
2018

TÁSSIA DIAS FIGUEREDO

**MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS POR
ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização: Produção e Gestão do Ambiente Construído do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador (a): Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva

**Belo Horizonte,
2018**

DEDICATÓRIA

*À **Deus** pelas possibilidades e oportunidades
a mim proporcionadas nesta vida.*

AGRADECIMENTOS

À Deus por me proporcionar as oportunidades diárias, inclusive a realização dessa especialização, e por me dá a saúde física e mental para buscar meus objetivos.

Ao Professor Adriano de Paula e Silva pela orientação, presteza e disponibilidade.

À minha família por acreditar em mim e me passar a força e o entusiasmo necessários para que eu sempre busque meu melhor.

Ao meu companheiro Adriano Xavier pelo incentivo e suporte para que eu pudesse realizar essa especialização.

Aos meus colegas de especialização que colaboraram de alguma forma com algum incremento de conhecimento ao longo do curso e pelos momentos alegres e descontraídos, em especial à Patrícia Oliveira e Dayenne Matos.

A todos os professores da especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da UFMG, que com disposição e boa vontade nos transmitiram um pouco do conhecimento adquirido, nos beneficiando com conhecimento de qualidade indiscutível e nos transformando em profissionais mais preparados e qualificados para o mercado.

Ao Ricardo Barbosa do laboratório de concreto do DEMC da UFMG por dispor do seu tempo para me auxiliar com os procedimentos experimentais da monografia, sempre com muita presteza.

Às pessoas que direta ou indireta colaboraram de alguma forma para a realização dessa monografia, em especial ao amigo Marcelo Lima e ao Sr. Nei Cardim pela disponibilidade e contribuição quanto as informações e registros do estudo de caso apresentados neste trabalho.

*“Ninguém pode construir em teu lugar as
pontes que precisarás passar para
atravessar o rio da vida. Ninguém, exceto tu,
só tu”.*

(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

As estruturas de concreto em algum momento da sua vida útil sofrerão deterioração, seja pelo envelhecimento natural ou pelo envelhecimento precoce. As deteriorações por alteração química de alguma forma sempre farão parte do processo de degradação seja como causa primária, seja secundária ou associada a outras. Todavia, comumente as causas químicas iniciam o processo de degradação e com frequência essas causas vêm atingido de forma precoce as estruturas de concreto, de forma que devem ser estudados e entendidos com mais profundidade. Essas interações químicas frequentemente ocorrem entre os agentes agressivos do ambiente e a pasta de cimento, com algumas exceções. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo analisar e estudar as origens, formas de manifestação e fatores intervenientes dos principais mecanismos de deterioração de causa química em concretos, além de abordar medidas preventivas para cada um deles. Foi realizado para isso uma revisão bibliográfica acerca do tema, associada a estudo de caso de estruturas atingidas pelas manifestações patológicas de causa química e pela realização de procedimentos experimentais demonstrativos para verificação da ação de dois desses mecanismos. Por meio desse estudo, verificou-se que algumas ações e medidas, principalmente na fase de execução e projeto, podem ser determinantes para evitar e postergar a ação das deteriorações de causa química, assim como ações de manutenção durante a vida útil. Por fim, esse estudo constata que é essencial o conhecimento sobre as causas e mecanismos e sintomas da degradação química do concreto bem como das medidas preventivas a fim de se produzir estruturas mais duráveis e com maior vida útil.

Palavras-chave: Concreto. Alterações químicas. Manifestações patológicas. Causas químicas de degradação. Deterioração do concreto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho das estruturas de concreto.....	24
Figura 2 - Desempenho da estrutura ao longo do tempo.....	25
Figura 3 - Origem das Manifestações Patológicas.....	29
Figura 4 - Deterioração do concreto por reações químicas.....	34
Figura 5 - Avanço do processo de carbonatação no concreto.....	36
Figura 6 - Corrosão resultante dos efeitos da Carbonatação sobre o pilar de uma indústria.....	37
Figura 7 - Representação da carbonatação no interior de uma fissura.....	42
Figura 8 - Estruturas comprometidas pelo ataque de cloretos em região marinha. ..	46
Figura 9 - Ação dos íons cloretos na corrosão do aço.....	47
Figura 10 - O cloreto no interior do concreto.....	50
Figura 11 - Dois corpos de prova moldados em Laboratório.....	62
Figura 12 - Borrifador.....	62
Figura 13 - Solução pronta de fenolftaleína diluída em álcool a 1%.....	62
Figura 14 - Paquímetro.....	63
Figura 15 - Aspersão de fenolftaleína no corpo de prova que ficou exposto as intempéries.....	64
Figura 16 - Corpo de prova carbonatado.....	65
Figura 17 - Aplicação da solução de fenolftaleína sobre o corpo de prova não exposto as intempéries.....	66
Figura 18 - Corpo de prova após alguns minutos da aspersão de fenolftaleína.....	67
Figura 19 - Imagens da leitura da medida da frente de carbonatação do corpo de prova.....	67
Figura 20 - Corpo de prova de concreto.....	68
Figura 21 - Cloreto de sódio ou sal de cozinha (NaCl).....	69
Figura 22 - Solução de nitrato de prata e tubo de ensaio.....	69

Figura 23 - Aplicação de cloreto de sódio sobre a superfície de concreto.	70
Figura 24 - Cloreto de sódio sobre a superfície do concreto.....	70
Figura 25 - Solução de nitrato de prata derramada sobre a superfície do corpo de prova de concreto.....	71
Figura 26 - Precipitado esbranquiçado de cloreto de prata resultado da reação do nitrato de prata com o cloreto de sódio.	72
Figura 27 - Entorno e proximidade da edificação com o mar.	74
Figura 28 - Deterioração da viga na área externa (varanda).....	76
Figura 29 - Deterioração da viga na área externa (varanda).....	76
Figura 30 - Danos da viga na área externa (varanda).....	76
Figura 31 - Deterioração da viga na área externa (varanda).....	76
Figura 32 - Deterioração da viga na área externa (varanda).....	77
Figura 33 - Detalhe da armadura da viga da área externa.....	77
Figura 34 - Deterioração da viga na área interna do vestiário.....	78
Figura 35 - Deterioração da viga na área interna do vestiário.....	78
Figura 36 - Comprometimento da viga na área interna da cozinha.....	79
Figura 37 - Detalhe da armadura da viga da cozinha.....	79
Figura 38 - Deterioração do pilar da varanda.....	80
Figura 39 - Deterioração do pilar da varanda.....	80
Figura 40 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento inferior. .	81
Figura 41 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento inferior. .	81
Figura 42 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento inferior. .	81
Figura 43 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento superior (térreo).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de Agressividade ambiental versus risco de deterioração das estruturas de concreto.....	20
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	21
Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm para estruturas de concreto.	22
Tabela 4 - Efeito de alguns produtos químicos comuns sobre o concreto.	31
Tabela 5 - Fatores de degradação química e o efeito sobre o desempenho do concreto.	33
Tabela 6 - Resumo das principais causas químicas de deterioração do concreto.	34
Tabela 7 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação.....	39
Tabela 8 - Fontes de cloretos no concreto.	45
Tabela 9 - Teor limite de cloreto para diversas normas.	48
Tabela 10 - Teor máximo de íons cloreto para a proteção das armaduras do concreto.	49
Tabela 11 - Teor máximo de cloreto em água de amassamento.	49
Tabela 12 - Coeficiente de difusão de cloretos, a 25°C, em pasta de cimento com a/c igual a 0,5.....	52
Tabela 13 - Teor máximo de cloretos no agregado.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACBM	Center for Advanced Cement-based Materials
ACI	American Concrete Institute (Norma Americana)
BS	British Standard (Norma Britânica)
CA	Concreto Armado
CEB	Comitè Europeu Du Beton
CP	Concreto Protendido
EN	Norma Europeia
ENV	Pré-Norma Europeia
FIHP	Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira regulamentada
pH	Potencial de hidrogênio ou hidrogeniônico
RAA	Relação álcali-agregado
RAC	Reação álcali-carbonato
RAS	Reação álcali-sílica

LISTA DE SÍMBOLOS

AgNO₃	Nitrato de prata
AgCl	Cloreto de prata
C₃A	Aluminato tricálcico
CaCl₂	Cloreto de cálcio
CaCO₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
Ca(OH)₂	Hidróxido de cálcio
Cl⁻	Íon cloreto
CO₂	Dióxido de carbono
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Fe⁺⁺	Íon ferro
FeCl₃	Cloreto Férrico
Fe(OH)₃	Hidróxido de Ferro III ou hidróxido férrico
H₂CO₃	Ácido carbônico
H₂O	Água
K⁺	Íon potássio
KOH	Hidróxido de potássio
Mg²⁺	Íon Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Na⁺	Íon sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaNO₃	Nitrato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NH₄OH	Hidróxido de amônio
O₂	Oxigênio
OH⁻	Hidroxilas
SO₂	Dióxido de enxofre
Wk	Abertura característica da fissura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1.	OBJETIVOS DA PESQUISA	15
1.1.1.	<i>Objetivo Geral</i>	15
1.1.2.	<i>Objetivo Específico</i>	15
1.2.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	15
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O CONCRETO	17
2.2.	DURABILIDADE E DESEMPENHO DO CONCRETO	19
2.3.	VIDA ÚTIL DO CONCRETO	24
2.4.	GENERALIDADES SOBRE PATOLOGIA E DEGRADAÇÃO DO CONCRETO	27
2.4.1.	<i>Classificação: Causas e Origens das Patologias</i>	28
2.5.	ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO CONCRETO	29
2.6.	PRINCIPAIS MECANISMO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS POR ALTERAÇÃO QUÍMICA NO CONCRETO	35
2.6.1.	<i>Carbonatação</i>	35
2.6.2.	<i>Ataque por Cloretos</i>	44
2.6.3.	<i>Ataque por Sulfatos</i>	55
2.6.4.	<i>Reação Álcali-Agregado</i>	57
2.6.5.	<i>Ataque por Ácidos</i>	59
3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	61
3.1.	ENSAIO DE LABORATÓRIO PARA VERIFICAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	61
3.2.	ENSAIO DE LABORATÓRIO PARA VERIFICAÇÃO DE ATAQUE POR CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	68
4	ESTUDO DE CASO	73
4.1.	METODOLOGIA	73
4.2.	CONTEXTUALIZAÇÃO	73
4.3.	A VISTORIA: INSPEÇÃO VISUAL	74

4.3.1.	<i>Danos generalizados nas vigas</i>	75
4.3.2.	<i>Danos nos pilares</i>	79
4.3.3.	<i>Danos nas lajes</i>	80
4.4.	RESULTADOS: DIAGNÓSTICO DAS POSSÍVEIS CAUSAS	82
4.5.	RECOMENDAÇÕES	83
4.6.	CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO	84
5	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concreto é crescente em todo mundo, e juntamente com esse produto é crescente também a incidência de manifestações patológicas em seus elementos e estruturas. Inicialmente, esse produto tão consumido, já chegou a ser considerado de durabilidade ilimitada, entretanto, no decorrer do tempo, com a sua difusão percebeu-se que isso é uma inverdade.

Existia até a década de 70 uma grande preocupação apenas com as resistências mecânicas das estruturas de concreto, e em decorrência disso as dimensões das estruturas eram bem mais robustas que as da atualidade, e isso refletia na durabilidade das estruturas que resistiam por muitos anos sem nenhuma degradação significativa e sem comprometer sua segurança estrutural.

Porém, o concreto sempre estará suscetível a manifestações patológicas ao longo da sua vida, seja pelo envelhecimento “natural” e fim da sua vida útil, seja pelo envelhecimento precoce. De acordo com Figueiredo (1994) citado por Silva (2006), os processos que podem levar à diminuição da durabilidade do concreto são vários e altamente complexos, sendo na maioria das vezes dependentes da concepção estrutural escolhida durante o projeto, das características e composição do concreto, da qualidade de execução, do meio ambiente, da forma de uso e da política de conservação.

Hoje, com a execução de peças e estruturas de concreto cada vez mais esbeltas, percebe-se a necessidade de execução de estruturas com maior durabilidade e vida útil, a fim de evitar o envelhecimento precoce e conseqüentemente as manifestações patológicas precoces. Devido à evolução do conhecimento dos mecanismos de deterioração do concreto, ocorrida nos últimos anos, a normalização avança em direção a concretos adequados à durabilidade, isso inclui a Norma Brasileira NBR 6118 (ANBT, 2014) – Projeto de Estruturas de Concreto: Procedimentos.

Com a frequência e precocidade em que vêm ocorrendo as manifestações patológicas dos elementos e estruturas de concreto, em especial as de causas química, torna-se necessário o estudo mais intenso das suas causas e formas de manifestação. Dentre os diversos processos que causam deterioração em concretos, são causas comuns e importantes os mecanismos de manifestações patológicas de

causas químicas, que são grandes responsáveis pela redução de durabilidade e consequente envelhecimento precoce de elementos de concreto.

Essas reações químicas resultam das interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio ambiente externo e os constituintes da pasta de cimento ou podem resultar de outras reações dentro da própria da estrutura do concreto. Ainda, se manifestam por meio de efeitos físicos nocivos à estrutura, dentro os quais é possível destacar o aumento da porosidade e da permeabilidade, a diminuição da resistência, a fissuração e o destacamento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O estudo das manifestações patológicas de causas químicas, contribui essencialmente para a necessidade de entender e de evitar a incidência desse tipo de manifestação em elementos de concreto, principalmente em concretos estruturais em que os efeitos são mais danosos, pois causam diminuição do desempenho mecânico e da vida útil das estruturas. Além disso, essas manifestações geram um incremento significativo do ponto de vista financeiro quando necessária a recuperação e reforço dos elementos afetados.

Tendo em vista a incidência constante de manifestações patológicas por alteração química em concretos e sabendo que essas alterações têm como consequência o comprometimento do desempenho e vida útil das estruturas promovendo sua deterioração, essa pesquisa contribuirá para o estudo das origens, das formas de manifestação, e fatores intervenientes dos principais mecanismos de deterioração por causas químicas em concretos.

Esse estudo também colaborará significativamente no que diz respeito a proposição de medidas de ações preventivas e protetivas, principalmente considerando as condições nas quais as estruturas estarão expostas, a fim de obter estruturas de concreto mais duráveis.

Para as análises dessa pesquisa serão utilizados materiais bibliográficos para fundamentação teórica, além de estudo de caso prático, que constará de visita de campo e de análise visual e fotográfica. Complementarmente, serão apresentados de forma ilustrativa alguns testes experimentais realizados em laboratório, comumente utilizados para a verificação da existência de manifestações patológicas provocadas por alterações químicas dos materiais de construção.

1.1. Objetivos da Pesquisa

1.1.1. Objetivo Geral

A pesquisa tem como objetivo geral estudar e analisar as origens, formas de manifestação e fatores intervenientes dos mecanismos de deterioração de causa química em concretos.

1.1.2. Objetivo Específico

Como objetivos específicos pretendem-se:

- a) Apresentar e analisar as principais e mais comuns manifestações patológicas por alteração química em concretos;
- b) Levantar métodos preventivos para evitar/ mitigar a ocorrência desse tipo de manifestação;
- c) Apresentar, por meio de estudo de caso, a análise de elementos de concreto afetado por manifestações patológicas de causa química.

1.2. Limitações do Trabalho

Para análise do estudo de caso constante nesse trabalho foi executado apenas inspeção visual e coleta de informações, portanto não serão realizados aqui quaisquer ensaios experimentais de laboratório para verificação da integridade das estruturas afetadas pelas manifestações patológicas por alteração química. Portanto, a análise e abordagem ficará apenas pela análise visual das estruturas afetadas.

Dessa forma, os testes experimentais realizados e abordados no capítulo 3 – Procedimentos Experimentais – serão apenas ilustrativos e, portanto, não foram realizados em estruturas reais afetadas e sim em corpos de prova produzidos para esse fim.

1.3. Estrutura do Trabalho

Essa pesquisa encontra-se estruturada em 5 capítulos da seguinte maneira:

No *Capítulo 1* será apresentada a Introdução do trabalho, nesse item será abordada a delimitação do tema, a fundamentação, a justificativa, os objetivos, as limitações e a estruturação do trabalho. Conterá, em resumo, uma breve visão acerca das manifestações patológicas por alteração química no concreto e o que será abordado nos capítulos seguintes.

No *Capítulo 2* será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, uma abordagem dos fundamentos teóricos sobre as manifestações patológicas nos concretos com ênfase nas alterações/causas químicas. Serão apresentados alguns conceitos básicos de durabilidade, desempenho e vida útil, bem como explicações sobre generalidades das patologias e degradação do concreto e suas alterações químicas. Do mesmo modo, serão discutidos e analisados os principais mecanismos das manifestações patológicas por alteração química do concreto. Por fim, serão apresentadas medidas preventivas para as mesmas.

No *Capítulo 3* serão apresentados de forma ilustrativa alguns testes experimentais a serem realizados em laboratório, comumente utilizados para a verificação da existência de manifestações patológicas provocadas por alterações químicas do material de construção. Serão realizados os ensaios de carbonatação e o ensaio de ataque por cloretos em corpos de prova de concreto.

No *Capítulo 4* será apresentado um estudo de caso de uma estrutura de concreto atingida fortemente por manifestações patológicas de causa química, sendo ela uma edificação comercial. Essa análise será baseada na coleta de informações durante visita técnica e análise visual das estruturas afetadas.

No *Capítulo 5*, finalmente, será apresentada uma breve conclusão sobre a temática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações Iniciais sobre o Concreto

O concreto é hoje um dos produtos mais utilizados no mundo, perdendo em consumo apenas para a água, ultrapassando inclusive o consumo de alimentos. De acordo com Pedroso (2009), estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que significa, segundo a *Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado* (FIHP), aproximadamente, um consumo médio de 1,9 tonelada de concreto por habitante por ano em todo o mundo.

É quase inevitável que as obras e construções hoje em dia tenham pelo menos algum elemento executado em concreto, se não todas as construções certamente a maioria absoluta delas, sejam elas construções residenciais, comerciais, industriais, obras de saneamento ou de infraestruturas.

A combinação do concreto, responsável pela resistência a compressão, com o aço, responsável pela resistência a flexão, tem tornado o concreto armado o material estrutural mais conhecido e usado em todo o mundo, em especial por serem compatíveis quando a aderência e dilatação térmica (RIBEIRO, 2014).

Seu elevado consumo se justifica visto que a humanidade não encontrou um material que apresente as características, desempenho e diversidades de uso ao menos semelhantes ao desse material. Dessa forma, ainda não foi possível encontrar um material que possa substituí-lo levando em consideração também economia e facilidade de produção.

A vantagem da utilização do concreto em relação aos outros materiais de construção diz respeito a suas características e as circunstâncias próprias em que se desenvolvem as obras. Desse modo, destaca-se como as características mais significativas: economia de construção; resistência a agressões químicas do ambiente; resistência a agressões físicas do ambiente; e adaptabilidade a qualquer forma de construção (FUSCO, 2008).

O concreto como material construtivo tem alcançado nas últimas décadas um incremento elevado de qualidade e resistência, resultado não só de pesquisas e estudos, como de um controle tecnológico e de um domínio do seu comportamento estrutural.

O concreto, porém, não se apresenta como um sólido perfeito, porquanto apesar da sua aparência visual lisa, microscopicamente é um material bastante poroso. Poros esses que a depender da sua quantidade e dimensões podem ser responsáveis por problemas futuros, pois permitem a entrada de agentes agressivos que comprometerão sua estrutura.

Essa quantidade de rede de poros contidos no concreto, que os torna mais ou menos permeável, pode ser agravada por diversas razões, das quais é possível elencar como principais: a quantidade excessiva de água de amassamento na sua composição, que ao evaporar deixa vazios; a granulometria inadequada do agregado; a forma inadequada do grão dos agregados; a homogeneização incorreta da mistura; lançamento executado de forma incorreta; má qualidade da forma; adensamento mal executado ou falta dele; e ausência de cura adequada.

O concreto ainda é um material extremamente complexo, apesar de aparentemente simples, posto que ainda há uma dificuldade no entendimento dos mecanismos da sua estrutura e da sua formação como material, principalmente por sua distribuição heterogênea dos componentes sólidos e por seus vazios (RIBEIRO, 2014).

As propriedades do concreto ainda são consideradas um desafio devido a sua complexa microestrutura, já que o transporte de fluidos na sua estrutura depende de fatores diversos que vão desde a porosidade e a distribuição do tamanho desses poros, sua conectividade e tortuosidade até a fração volumétrica de cada material, dos detalhes da hidratação e do processo de produção (NEPOMUCENO, 2005).

Ainda assim, nos últimos 100 anos, segundo a ACBM (s.d. *apud* HELENE e ANDRADE, 2010), o concreto superou todas os limites e fronteiras do conhecimento da Engenharia, sendo considerado o material estrutural mais novo da Engenharia e que está em constante desenvolvimento, o que não nos permite prever seu futuro e muito menos seus limites. Pesquisar, projetar, dosar, construir, aproveitando todas as características de versatilidade e desempenho desse material, assim como utilizá-lo da forma correta, considerando inclusive as questões ambientais e sustentáveis, poderá gerar resultados surpreendentes no decorrer dos anos (HELENE e ANDRADE, 2010).

Dessa forma, a busca por novas pesquisas e estudos na área, além da transferência de tecnologia se configuram como o caminho para o desenvolvimento crescente das características desse material, tornando-o menos poroso e

consequentemente menos permeável, reduzindo assim o ataque por agentes agressivos e a incidência precoce de manifestações patológicas.

2.2. Durabilidade e Desempenho do Concreto

A durabilidade de elementos de concreto já foi considerada ilimitada, porém ao longo do seu uso cada vez mais intenso verificou-se que isso é uma inverdade. O concreto se deteriora ao longo da sua vida útil e é necessário criar métodos e condições para elaboração de concretos mais duráveis, evitando o aparecimento de manifestações patológicas precocemente.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas na sua norma NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto: Procedimentos (ABNT, 2014, p.13), define a durabilidade como “a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”.

De acordo com a ISO 13823 (2008) citado por Possan e Demoliner (2013) a durabilidade de uma estrutura ou seus componentes consiste na capacidade de satisfazer os requisitos de desempenho do projeto durante a vida útil especificada, quer seja sob a ação do meio ambiente ou do envelhecimento natural, desde que tenham sua manutenção planejada.

Medeiros, Andrade e Helene (2011) ainda conceitua a durabilidade como “o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Portanto, não é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto”.

De acordo com todos os entendimentos sobre durabilidade, o meio ambiente onde o concreto está inserido tem total influência sobre a sua durabilidade, sendo considerado talvez um dos principais fatores de influência na análise de deterioração das estruturas.

Isso se confirma na NBR 6118, que nas suas versões mais recentes considera a relação entre durabilidade e a classe de agressividade do ambiente como parâmetro para classificar o risco de degradação que a estrutura está sujeita, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classe de Agressividade ambiental versus risco de deterioração das estruturas de concreto.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{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 (ABNT, 2014, p.17).

Porém, para a garantia de durabilidade das estruturas do concreto não deverá ser levado em conta apenas a resistência às agressões externas do meio no qual está imerso, mas também o emprego de materiais não-expansivos na sua produção (FUSCO, 2008). Também é preciso considerar que as características de cada um dos constituintes do concreto influenciarão significativamente para a durabilidade do composto, modificando suas propriedades, tais como: a compacidade, a porosidade, permeabilidade e capilaridade (POGGIALI, 2009).

O estudo com relação a durabilidade de estruturas de concreto tem evoluído em função do avanço no conhecimento sobre a ação dos agentes agressivos, líquidos e gases, através dos mecanismos de transporte que ocorrem nas estruturas porosas no concreto, possibilitando dessa forma aliar o fator tempo aos modelos matemáticos que expressam quantitativamente esses mecanismos (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

A durabilidade do concreto é normalmente assegurada pela baixa permeabilidade, uma vez que os agentes agressivos não penetram na massa, nem atingem a armadura. Entre os agentes atmosféricos que podem levar a reações indesejáveis está o CO₂ do ar, que provoca a carbonatação, reduzindo o pH do concreto e expondo a armadura à corrosão (VILASBOAS, 2004).

A característica do concreto é somente um dos parâmetros que influenciam a durabilidade das estruturas, dentre os quais pode-se incluir o cobrimento da armadura, os detalhes construtivos e arquitetônicos, a deformidade da estrutura, etc. Isso significa dizer que utilizar um concreto considerado “durável” não garante que toda a estrutura terá inevitavelmente durabilidade (ANDRADE, 2005).

A grande questão com relação a durabilidade do concreto é que não é possível mensura-la tão precisamente como acontece com a resistência mecânica, a análise é basicamente qualitativa e não quantitativa. Apesar disso, é possível definir parâmetros durante a fase de projeto e produção de modo a interferir de forma positiva na durabilidade dos elementos e estruturas de concreto.

Nos documentos em que tratam de durabilidade de estruturas de concreto, e em especial a NBR 6118 (ABNT, 2014), também fica claro que o problema da durabilidade e qualidade das estruturas de concreto deve considerar, além dos relativos a classificação da agressividade do meio ambiente, a da classificação da resistência do concreto quanto ao risco de deteriorização, que se refletem na definição dos cobrimentos para as estruturas e na relação água/cimento a ser considerada na produção, conforme podem ser verificadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

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

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.
^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.
^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p.18).

Tabela 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm para estruturas de concreto.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b 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, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p.20).

A fim de se obter elementos e estruturas de concreto mais durável é preciso considerar também na sua produção, além do fator água cimento, cobrimentos e classe de resistência mínima do concreto, a dosagem mínima de cimento e o método de cura.

A durabilidade pode ainda ser definida de forma mais pertinente se levar em consideração o desempenho mínimo pretendido para o material, em um intervalo de tempo esperado, em função de um meio ambiente específico, além de não deixar de considerar a composição, compactação, adensamento e cura do concreto e cobrimento das armaduras (RIBEIRO, 2014).

Desse modo, o desempenho é outro conceito que deve estar aliado ao entendimento de durabilidade do concreto, e essa ideia diz respeito a etapa de uso da estrutura, porém reflexo das etapas de projeto, construção e manutenção.

A NBR 6118 (ABNT, 2014, p.13) define o desempenho como a “capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil, não podendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o

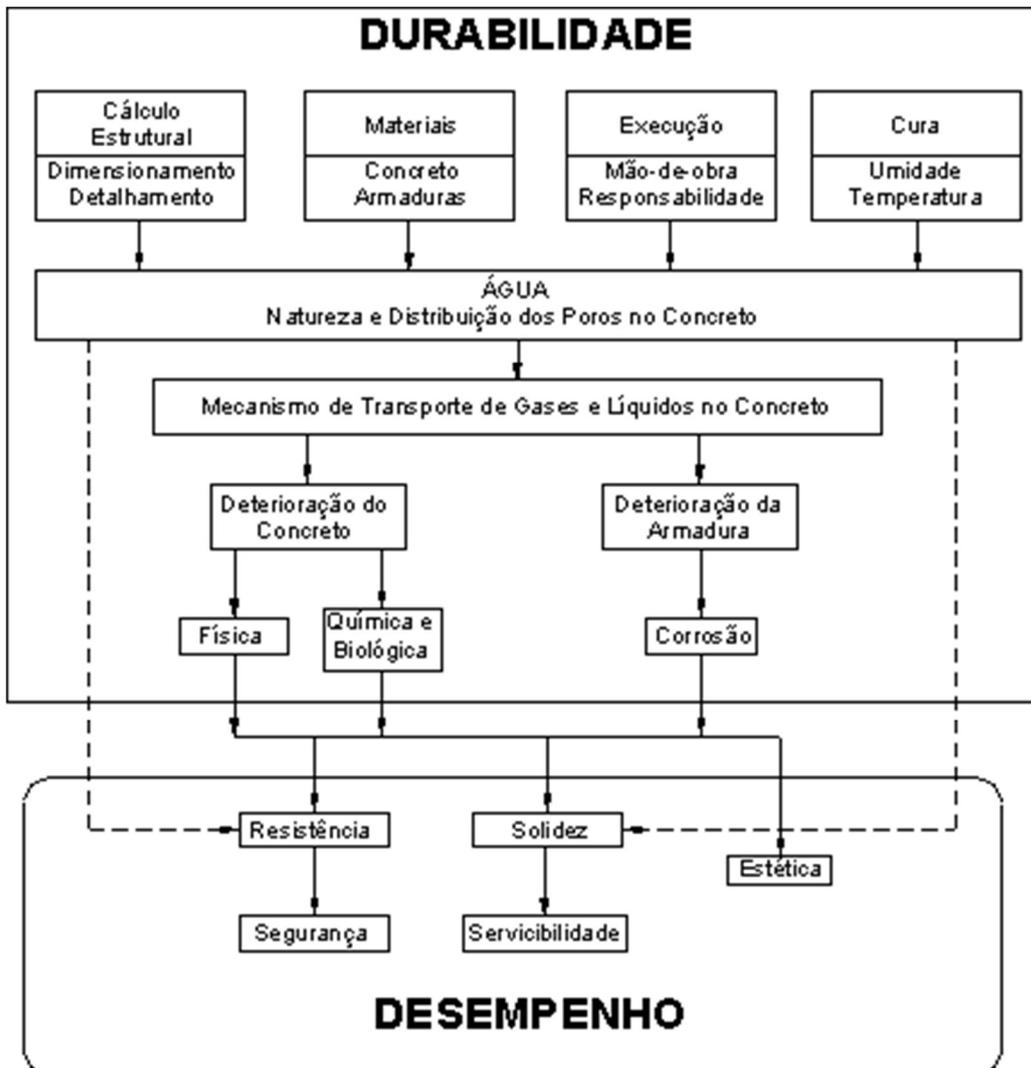
qual foi projetada”. Já Souza e Ripper (1998) definem desempenho de forma mais simplificada e sucinta como o comportamento em serviço do produto ao longo da vida útil. Assim, uma estrutura de concreto com desempenho insatisfatório estará com algum grau de desgaste ou deterioração e necessitará de intervenção.

Essa relação ou inter-relação entre os conceitos de durabilidade e desempenho em elementos de concreto pode ser observada e entendida conforme Figura 1. Pode-se verificar através dela os vários fatores que influenciam na durabilidade e desempenho das estruturas de concreto. Entre esses fatores a água destaca-se, pois através dos mecanismos de transporte é a responsável por levar os agentes agressivos para o interior do concreto, o que resultará conseqüentemente na deterioração da estrutura.

Dessa maneira, uma estrutura executada de forma inadequada terá uma baixa durabilidade e como consequência um desempenho insatisfatório e sem as devidas manutenções terá uma vida útil ainda mais limitada.

Importante enfatizar que apesar de um elemento de concreto ter boa durabilidade e excelente desempenho, não significa dizer que não irá se deteriorar em algum momento da sua vida útil, mesmo com a devidas manutenções.

Figura 1 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho das estruturas de concreto.



Fonte: SOUZA e RIPPER (1998, p.20).

2.3. Vida Útil do Concreto

Como vida útil de uma estrutura de concreto entende-se, segundo Helene (1997), como o período de tempo que se deseja que a estrutura atenda a certos requisitos ligados a função, sem deixar de considerar um mínimo de manutenção. Ele ainda a conceitua como o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada sem necessidade de intervenções não previstas, isto é, incluem nesse período de tempo as operações de manutenção previstas e especificadas na fase de projeto.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) a vida útil de projeto é o período de tempo durante o qual as estruturas de concreto mantêm suas características, sem que haja intervenções significativas, desde sejam cumpridos os requisitos de uso e manutenção, e executados os reparos que sejam necessários quando da ocorrência de danos acidentais.

Já a NBR 15.575 (ABNT, 2013) – Edifícios Habitacionais de até 5 Pavimentos: Desempenho – define a vida útil como o período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados.

Também é possível conceituar a vida total de uma estrutura como sendo o resultado da deterioração pelo seu uso e interação com o meio ambiente e os incrementos de desempenho provenientes das intervenções de manutenção (SOUZA et al., 2016). A Figura 2 representa o desempenho da estrutura ao longo do tempo.

Figura 2 - Desempenho da estrutura ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de MITIDIERI FILHO (2007) apud SOUZA et al. (2016, p.2).

O conceito de vida útil do concreto está intrinsecamente ligado aos conceitos de durabilidade e de desempenho, ficando complexo falar de um sem abordar o outro.

Essa relação intrínseca entre os conceitos de durabilidade e vida útil também é expressa na NBR 6118 (ABNT, 2014, p.15), em sua prescrição de exigências quanto a durabilidade das estruturas.

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil”.

O entendimento sobre vida útil atrelado a durabilidade do concreto é de fundamental importância para auxiliar na previsão do comportamento do concreto à longo prazo, para prevenir manifestações patológicas precoces e contribuir para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

A evolução do estudo da vida útil do concreto deve necessariamente passar por um maior conhecimento sobre durabilidade dos materiais, dos componentes e dos vários sistemas estruturais, mas também pela melhoria dos processos de construção e dos planos e técnicas de manutenção (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para que o concreto possa ter vida útil compatível com o projeto, deve ter os materiais convenientemente escolhidos e dosados, ser colocado com boa compactação e curado adequadamente para que apresente bom desempenho frente aos agentes agressivos (ISAIA, 2002).

Ainda, a vida útil depende não só do desempenho dos elementos e componentes estruturais, como dos outros elementos e partes da obra. E sua definição quanto a duração, no que diz respeito as estruturas, compete não só ao dono da obra como aos projetistas envolvidos (arquitetura e estrutural), e deverá estar registrado na documentação técnica da obra (HELENE, 2001).

A vida útil deve ser analisada de forma mais ampla envolvendo não somente projeto como execução, materiais, uso, operação e principalmente a manutenção, considerando uma perspectiva de desempenho, qualidade e sustentabilidade (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

Assim, conceber uma estrutura durável implica no emprego de medidas e procedimentos que garantam às estruturas e materiais que a compõe um desempenho aceitável ao longo da sua vida útil (SOUZA e RIPPER, 1998).

Entender e tornar aplicável o conceito de vida útil em projeto é extremamente importante não apenas no que diz respeito as estruturas de concreto como aos diversos sistemas de uma construção, haja vista as exigências cada vez maiores das normas técnicas vigentes, em especial a NBR 6118 (ABNT, 20014) e a NBR 15.575 (ABNT, 2013).

A busca pelo aumento da vida útil também significa uma boa solução a longo prazo para economia de energia, redução de impactos, preservar recursos naturais e prolongar sua potencial extração (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

2.4. Generalidades sobre Patologia e Degradação do Concreto

O termo patologia, procedido da área de saúde, se refere ao estudo das doenças, seus sistemas e natureza das modificações que elas causam no organismo. Esse termo migrou para a construção civil sendo utilizado quando ocorre queda ou perda de desempenho de um produto ou componente do sistema (ANDRADE e SILVA, 2005).

A patologia das estruturas é o novo campo da engenharia das construções, vasto e multidisciplinar, que estuda as origens, formas de manifestações, consequências e mecanismos de degradação e anomalia das estruturas (SOUZA e RIPPER, 1998). E para que um sintoma seja considerado patológico é preciso que ele atinja umas das exigências da construção, seja sua capacidade estética, funcional ou mecânica, ou seja, altere a capacidade de o material desempenhar as suas funções como inicialmente pretendido (ANDRADE e SILVA, 2005).

Apesar do concreto ser considerado um material durável, ainda assim a ação dos agentes naturais sobre as estruturas causará em algum momento a perda progressiva do seu desempenho, causando deterioração do concreto (ANDRADE, 2005).

Os principais fatores que agem diminuindo a resistência do concreto e causando a deterioração são: a alta porosidade e permeabilidade, o uso de cimento impróprio, a cura insuficiente, ciclos de molhagem e secagem, altas temperaturas, cobrimento insuficiente das armaduras, entre outros (LORENZINI, 2006). Também os fatores climáticos têm importante influência sobre a degradação dos materiais, principalmente quando no exterior das estruturas, são eles: temperatura, água, radiação solar, contaminação do ar e vento (FERREIRA, 2000).

A água é o elemento que está mais presente como agente de deterioração nos mecanismos de degradação do concreto e evitar o contato com a água é a melhor forma de evitar a sua deterioração (ANDRADE, 2005).

A degradação das características do concreto decorre frequentemente de uma ação conjunta de fatores interno e externos, sendo considerado um processo complexo que envolve reações físico-químico do concreto (interno) e do meio onde está inserido (externo). Esses fatores internos dizem respeito a qualidade do concreto, ou seja, a forma de mistura, lançamento e cura, enquanto que os fatores externos dizem respeito à retração, fluência e efeito térmico (FERREIRA, 2000).

2.4.1. Classificação: Causas e Origens das Patologias

Pode-se entender como a causa das patologias qualquer fator que venha a contribuir de forma direta ou indireta para a ocorrência desse problema. É possível elencar: as condições de exposição (ambiente marinho, presença excessiva de água); as solicitações mecânicas (sobrecargas e impactos); as características dos materiais constituinte (álcalis no cimento, sílica reativa nos agregados, cloreto nos aditivos); a espessura de cobrimento, entre outros (ANDRADE e SILVA, 2005).

As causas de degradação das estruturas de concreto são diversas e podem ser classificadas como: mecânicas, físicas, químicas e biológica. Sendo que estas podem ocorrer de forma isolada ou de forma simultânea, e irá depender da velocidade de propagação principalmente do meio que a estrutura está.

O estudo das causas dos processos de deterioração das estruturas de concreto é bastante complexo e considerado matéria de constante evolução, ademais pode ser considerado discutível o agrupamento dessas causas por similaridades (SOUZA e RIPPER, 1998).

Souza e Ripper (1998), classifica as causas de degradação das estruturas de concreto como causas intrínsecas, que são causas relacionadas às próprias estruturas e que tem origem nos materiais e peças estruturais durante a fase de execução e/ou utilização das obras, por falha humana, por questões próprias ao material concreto e por ações externas, inclusive acidentes; e em causas extrínsecas, que são as causas que podem ser vistas como os fatores que atacam as estruturas “de fora para dentro” durante as fases de concepção ao longo da vida útil desta e que independem da estrutura em si, assim como a composição interna do concreto, ou de falhas inerentes ao processo de execução.

Outro fator importante a ser considerado com relação a degradação e patologia das estruturas de concreto é a sua origem. Entende-se com origem das patologias as fases e etapas da vida da estrutura em que se originou o problema patológico. Eles podem ser de origem do projeto, de execução, de materiais e, finalmente de uso (ANDRADE e SILVA, 2005).

Ter o conhecimento sobre a origem de deterioração é fundamental importância não apenas para que sejam realizados os reparos exigidos, bem como para ter a

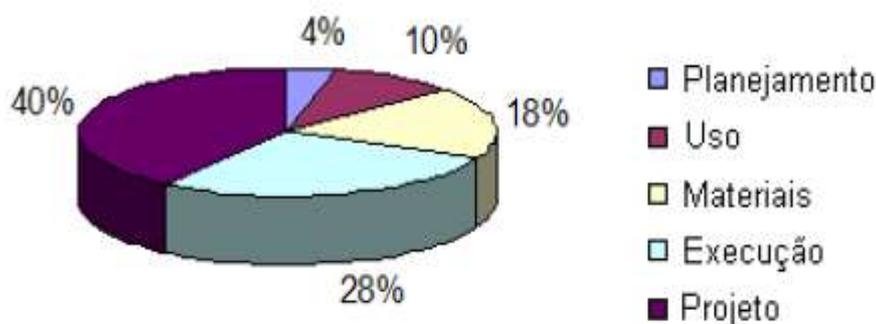
garantia que após reparada, a estrutura não volte a se deteriorar (SOUZA e RIPPER,1998).

Da mesma forma que a classificação das causas da degradação do concreto, a classificação das origens de degradação é bastante discutível, visto que outros autores a classificam distintamente.

De acordo com Helene (2007) citado por Araújo (2009), as manifestações patológicas se apresentam geralmente durante a fase de execução ou uso das estruturas, mas frequentemente eles são visualizados na fase de uso em função de ser a mais longa delas, já que as fases de planejamento, projeto e execução geralmente não duram mais de 2 anos. Porém, são nas etapas de projeto e execução que uma elevada porcentagem de manifestações patológicas tem origem.

Conforme é possível verificar na Figura 3, cerca de 40% das manifestações patológicas tem origem no projeto e 28% tem origem na execução, enquanto que a origem correspondente ao planejamento, ao uso e aos materiais juntos correspondem a 32% do total.

Figura 3 - Origem das Manifestações Patológicas.



Fonte: HELENE (2007) apud ARAÚJO (2009, p.1).

2.5. Alterações Químicas no Concreto

Os ataques químicos em estruturas de concreto ocorrem no seu interior pela ação de agentes agressivos que ingressam através da rede de poros constante em sua estrutura. Esses ataques podem se dá através de gases, vapores e líquidos, e além da umidade pode trazer junto com eles substâncias e elementos nocivos a composição do concreto e/ou do aço da estrutura. Esse ingresso é facilitado pelo

mecanismo de transporte desses fluidos para o interior do concreto, que podem ser através da difusão, migração, absorção capilar e permeabilidade.

Conforme afirma Roque e Moreno Junior (2005) são dois os fatores mais relevantes que estão envolvidos em grande parte dos processos químicos que afetam a durabilidade das estruturas de concreto, são eles: os mecanismos de transporte por meio dos poros e das fissuras - difusão, sucção capilar ou pressão hidráulica - e a presença de água.

Os processos de deterioração do concreto por reações químicas, quase sempre ocorrem por interações químicas entre os agentes agressivos do meio ambiente e os constituintes da pasta de cimento, porém há exceções que englobam: as reações álcali-agregado, que ocorrem entre os álcalis presente na pasta de cimento e certos minerais reativos no agregado; a hidratação retardada de CaO e MgO cristalinos, quando estão presentes em grandes quantidades no cimento Portland; a formação retardada da etringita; e a corrosão eletroquímica da armadura do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008).

Os principais agentes químicos ambientais responsáveis pela deterioração do concreto armado é o CO₂, águas, ácidos, cloretos e sulfatos. A ação do hidrogênio também pode causar deterioração do concreto, principalmente o originário dos ácidos, a qual a reação principal com o concreto será determinada pela concentração e solubilidade do cálcio resultante (GAIER, 2005).

Os fatores químicos podem agir tanto na pasta de cimento, como no agregado e na armadura do concreto, e estes estão relacionados com presença de substâncias químicas do meio ambiente, principalmente água, solo e atmosfera. Os mecanismos de deterioração química agem por meio de substâncias químicas sobre os componentes não metálicos do concreto, e entre as substâncias mais agressivas que agem sobre esses componentes destacam-se os ácidos clorídrico e sulfídrico (RIBEIRO, 2014).

O concreto em si, quando com uma pasta bem hidratada, geralmente se encontra em estado estável de pH, que varia entre 12,5 e 13,5, decorrente da grande concentração de íons presentes (Na⁺, K⁺ e OH⁻). Em contato com ambientes ácidos esse cimento entra em desequilíbrio químico e reduz o pH do concreto, trazendo efeitos nocivos. Esse ataque químico é função do pH do agente agressivo e da permeabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A ação dos ácidos sobre o concreto causa a destruição da sua estrutura porosa, produzindo efeitos inesperados na pasta de cimento endurecido, resultando em perda de massa e redução de secção do concreto. A velocidade desse tipo de degradação é proporcional à quantidade do ácido em contato com o concreto, e a perda de massa sucessiva acontece a partir da superfície exposta ao agente agressor (AGUIAR, 2006).

Na Tabela 4, Neville (1982) citado por Vilasboas (2004) relaciona os efeitos deletérios associados à presença de alguns ácidos e sais comuns sobre o concreto.

Tabela 4 - Efeito de alguns produtos químicos comuns sobre o concreto.

Velocidade de ataque à temperatura ambiente	Ácidos inorgânicos	Ácidos orgânicos	Soluções alcalinas	Soluções de sais	Diversos
Rápida	Clorídrico Fluorídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	-	Cloreto de alumínio	-
Moderada	Fosfórico	Tânico	Na (OH) > 20% *	Nitrato de amônio Sulfato de amônio Sulfato de sódio Sulfato de magnésio Sulfato de cálcio	Bromo (gás) Concentrado de sulfito
Lenta	Carbônico	-	Na(OH) 10 a 20%	Cloreto de amônio Cloreto de magnésio Cianeto de sódio	Cloro (gás) Água do mar Água pura
Desprezível	-	Oxálico Tartárico	Na (OH) < 10% Hipoclorito de sódio NH ₄ OH	Cloreto de cálcio Cloreto de sódio Nitrato de zinco Cromato de sódio	Amônia (líquida)

- Os agregados silicosos devem ser evitados, pois são atacados por soluções concentradas de hidróxido de sódio.

Fonte: NEVILLE (1982) apud VILASBOAS (2004, p. 39).

A resistência do concreto ao ataque químico está associada a permeabilidade e a porosidade, ou seja, propriedades relacionadas com a qualidade do concreto. Segundo afirma Helene (2001), a qualidade do concreto dependerá significativamente do tipo de cimento empregado, da relação água/cimento e também do grau de hidratação. São esses os principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar de água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusibilidade de água ou de gases, de migração de íons, assim como todas as propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras.

A resistência do concreto com relação a ação química geralmente altera-se com o tipo de cimento empregado. Os cimentos que melhor resistem as ações

químicas, em ordem decrescente são: cimento aluminoso, cimento super sulfatado, cimento Portland resistente aos sulfatos ou pozolânico, cimento Portland de alto forno ou de baixo calor de hidratação, cimento Portland de alta resistência inicial e cimento Portland comum. Entretanto, essa ordenação não poderá ser considerada como regra geral (BRANDÃO, 1998).

A ocorrência de degradação das estruturas de concreto, e conseqüente aparecimento de manifestações patológicas dificilmente será devida a uma única causa, o mais comum é que em fases mais evoluídas de degradação alguns fenômenos danosos estarão em ação. O mais comum é uma associação entre causas químicas e físicas de deterioração, colaborando em conjunto, de forma que a separação entre causa e efeito frequentemente torna-se praticamente impossível (VILASBOAS, 2004).

Frequentemente essa iniciação da deterioração do concreto acontece por processos químicos, apesar de que fatores físicos e mecânicos também possam estar presentes, combinados ou não, com os processos químicos (ROQUE e MORENO JUNIOR, 2005).

Como afirma Ribeiro (2004, p.96), “A degradação do concreto por ações químicas é um fenômeno extremamente complexo, envolvendo muito parâmetros, nem sempre fáceis de serem isolados e que atuam em diferentes graus”.

Conforme afirma Mehta e Monteiro (2008), os efeitos das reações químicas no concreto se apresentam de forma negativa, particularmente com aumento da porosidade, permeabilidade, destacamento, fissuração e perda de resistência mecânica. A deterioração de grande número de estruturas de concreto deve-se principalmente à ação do ataque de sulfatos, ataque por álcali-agregado e corrosão das armaduras, merecendo, desse modo, uma atenção especial.

Os principais fatores de degradação por causas químicas e os processos que afetam o desempenho do concreto, bem como a degradação resultante são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de degradação química e o efeito sobre o desempenho do concreto.

Factor de Degradação	Processo	Degradação
Químicos		
Água pura	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido e gases ácido	Neutralização	Despassivação do aço
Dióxido de carbono	Carbonatação	Despassivação do aço
Cloretos	Penetração, destruição de camada de passivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço + H ₂ O + O ₂	Corrosão	Expansão do aço, perda de \emptyset e de aderência
Tensão + cloretos	Corrosão do aço	Rotura dos tendões de pré-esforço
Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
Agregado(silica) + álcalis	Reacção da sílica	Expansão, desagregação
Agregado(carbonato) + álcalis	Reacção do carbonato	Expansão, desagregação

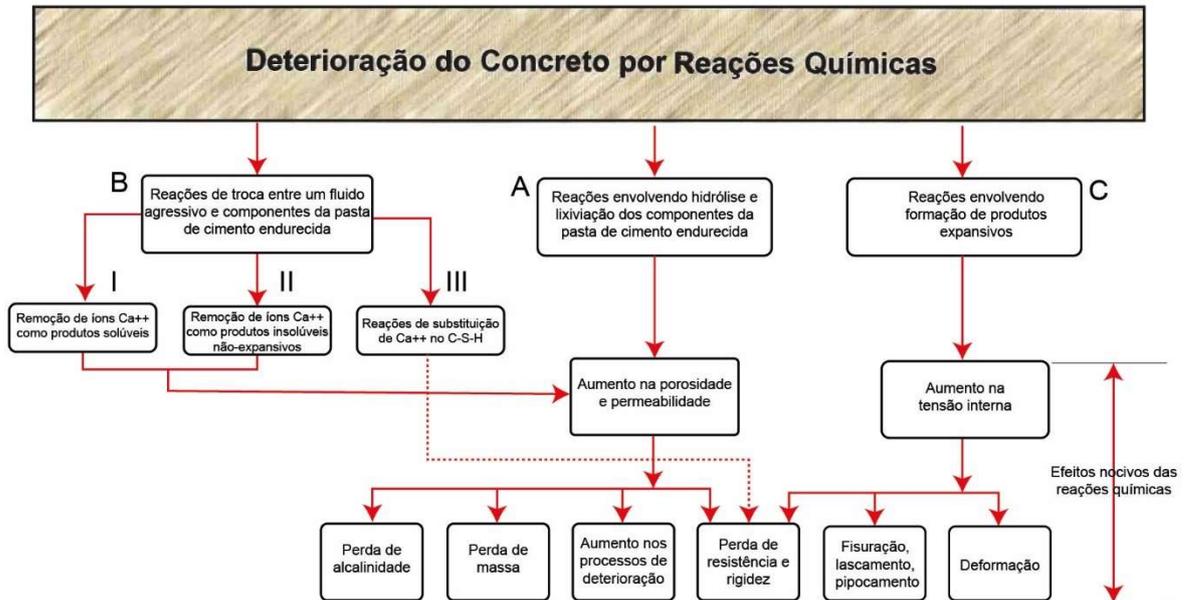
* *Betão=Concreto.*

Fonte: Adaptado de SARJA e VESIKARI (1996) apud FERREIRA (2000, p.3.5).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os processos químicos de deterioração do concreto podem ser divididos em três categorias, quais são: reações de troca entre um fluido agressivo e componentes da pasta endurecida; reações envolvendo hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta endurecida; e reações envolvendo formação de produtos expansivos.

A Figura 4 ilustra esquematicamente o desenvolvimento das três categorias de deterioração do concreto por reações químicas.

Figura 4 - Deterioração do concreto por reações químicas.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO (2008, p.158).

De forma análoga, conforme Tabela 6, Andrade (2005) subdivide as principais causas de degradação de origem química em: Lixiviação; Troca iônica por ação de sais e por ação dos ácidos; Formação de compostos expansivos por sulfatos de sódio, potássio, cálcio e magnésio, por reação álcali-agregado e por Hidratação MgO e CaO; Corrosão de armaduras; e Biológica.

Tabela 6 - Resumo das principais causas químicas de deterioração do concreto.

Origem da Deterioração	Causa	Sintoma	
Química	Lixiviação		
	Troca Iônica	Ação dos Sais	Dissolução
		Ação dos Ácidos	Decomposição Química
	Formação de Compostos expansivos	Sulfatos de sódio, potássio, cálcio e magnésio	Expansão
		Reação álcali-agregado	Fissuração
		Hidratação MgO e CaO	Decomposição Química
	Corrosão da armadura		Expansão
		Fissuração	
Biológica		Dissolução	
		Decomposição Química	

Fonte: ANDRADE (2005, p.762).

2.6. Principais Mecanismo das Manifestações Patológicas por Alteração Química no Concreto

As principais manifestações patológicas do concreto por alteração química são causadas pelos seguintes mecanismos de deterioração: carbonatação, ataques por cloretos, ataques por sulfatos, reações com álcali-agregados, ataques por ácidos, entre outros.

Esses mecanismos, responsáveis pelas manifestações patológicas de causas químicas, serão apresentados individualmente a seguir, todavia uma especial importância será dada a carbonatação e os ataques por cloretos, isso porque esses dois são os grandes responsáveis por grande parte das alterações químicas das estruturas de concreto e grandes responsáveis pela corrosão nas estruturas.

2.6.1. Carbonatação

Entende-se como a carbonatação do concreto a reação entre o CO₂ com o cimento hidratado. Em presença de umidade o CO₂ da atmosfera forma o ácido carbônico (H₂CO₃) que reage com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando o carbonato de cálcio (CaCO₃) (NEVILLE e BROOKS, 2013).

De acordo com Figueiredo (2005) a carbonatação é um processo físico químico de neutralização da fase líquida intersticial do concreto, saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e de outros compostos alcalinos, que recebe essa nomenclatura devido a maior incidência do CO₂ nas reações de neutralização.

Os compostos hidratados do cimento que estão predispostos à carbonatação além do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), são o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), assim como os silicatos alcalinos (SMOLCZYK *apud* FIGUEIREDO, 2005). É possível entender o processo da carbonatação desses compostos hidratados a partir das Equações 1 e 2.

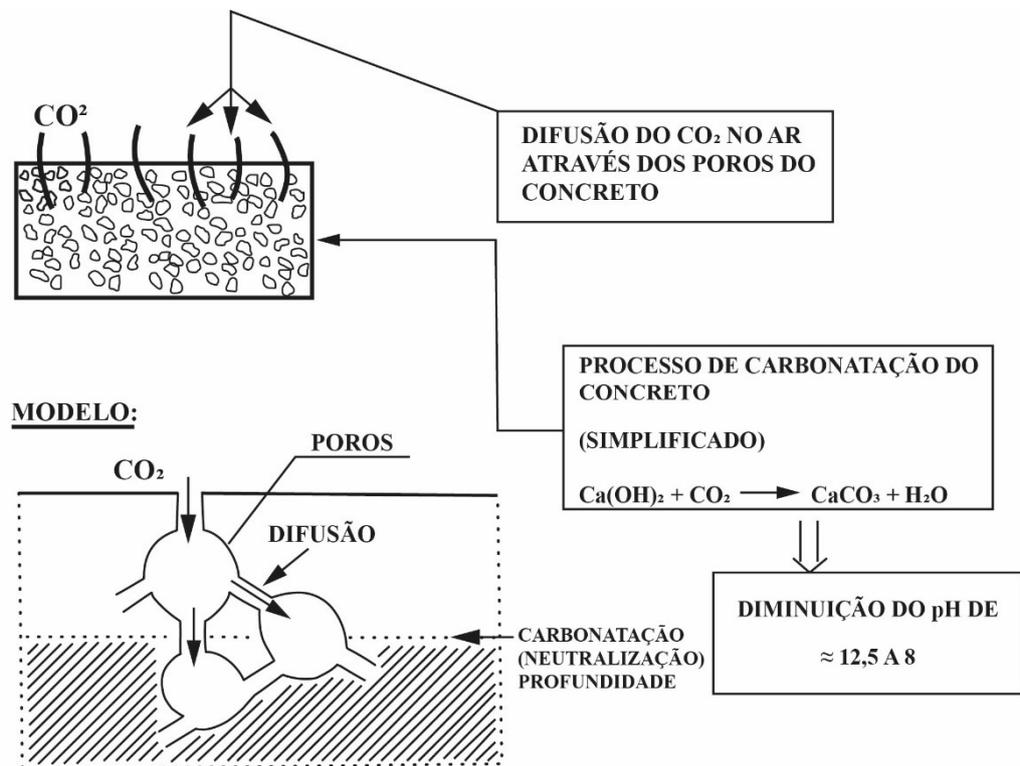


A carbonatação ocorre de forma lenta e penetra da superfície externa para o interior e é dependente da permeabilidade do concreto, da umidade relativa e do teor de CO₂ do ambiente (NEVILLE e BROOKS, 2013). De acordo com Silva (1995) citado por Aguiar (2006) em um concreto de qualidade mediana a velocidade de carbonatação varia entre 1mm e 3mm por ano, o que equivale de 1cm a 3cm a cada 10 anos.

O resultado da carbonatação é a perda de alcalinidade do concreto, devido a lixiviação dos compostos cimentícios, que reagem com os componentes ácidos do meio ambiente, levando o pH para valores abaixo de 9, enquanto que em condições normais/iniciais o concreto apresenta pH entre 12,5 e 13,5 (RIBEIRO, 2014).

Por meio da representação da Figura 5 é possível entender melhor o processamento e avanço da carbonatação nos poros do concreto.

Figura 5 - Avanço do processo de carbonatação no concreto.



Fonte: CEB-BI 152 (1984) apud FIGUEIREDO (2005, p. 831).

Como esse processamento acontece a partir da superfície externa, ocorre uma separação das regiões com diferença de pH. Conforme é possível observar no modelo da Figura 5, a região mais externa do concreto (área sem hachura) apresenta o pH mais baixo, com valores abaixo de 9, enquanto que a região mais interna (área

hachurada) apresenta pH mais elevado, com valores acima de 12. Esse avanço da carbonatação é progressivo em direção ao interior do concreto e é chamado de frente de carbonatação. A partir disso, é possível mensurar a profundidade da carbonatação desde a superfície, sendo possível estimar o tempo em que a frente de carbonatação atingirá a armadura, e, deste modo, em quanto tempo aproximadamente se iniciará o processo de corrosão.

A carbonatação de uma maneira geral não prejudica o concreto (exceto por uma pequena retração), contraditoriamente ela diminui a permeabilidade e torna a penetração dos agentes agressivos mais difíceis se comparado a concretos não carbonatados. Porém, o inconveniente diz respeito aos concretos armados, posto que a carbonatação diminui a alcalinidade da água presente nos poros do concreto, o que desestabiliza quimicamente a película de passivação existente no entorno do aço, deixando-o susceptível à corrosão (ARAÚJO, 2009). Em resumo, a película de passivação que protege o aço contra corrosão formada durante a hidratação da pasta do cimento, com o processo de carbonatação vai sendo destruída.

Na Figura 6 é possível observar a degradação de uma estrutura afetada pelo processo de carbonatação que conseqüentemente levou a ação da corrosão.

Figura 6 - Corrosão resultante dos efeitos da Carbonatação sobre o pilar de uma indústria.



Fonte: AGUIAR (2006, p.49).

A carbonatação é um processo que fatalmente atingirá o concreto ao longo da sua vida útil. Se faz necessário à sua compreensão considerando a durabilidade do concreto, visto que os efeitos da carbonatação podem modificar as características da estrutura da pasta de cimento endurecida, reduzindo não só o pH do concreto, como alterando a resistência e provocando pequenas retrações (ARAUJO, 2009).

Existem alguns métodos laboratoriais para avaliação da profundidade de carbonatação no concreto, que englobam: difração de raios-X, análise térmica diferencial, termografia e observação microscópica (AGUIAR, 2006). Porém, o método mais simples e mais utilizados para determinação da profundidade de carbonatação é por meio de indicadores de pH a base de fenolftaleína. Esse último método será abordado mais detalhadamente no Capítulo 3.

Também, é possível calcular a velocidade de penetração do CO₂ no concreto e entre os métodos para cálculo desse valor, o mais utilizado para prever a profundidade de penetração da carbonatação está relacionado com uma constante k, que depende das características do concreto, e com o tempo, conforme Fórmula 3 (FIGUEIREDO, 2005):

$$e_{CO_2} = k\sqrt{t} \quad (3)$$

Onde:

e_{CO_2} é a profundidade de penetração do CO₂ em mm;
 k_{CO_2} é uma constate que depende de características do concreto;
t é o tempo em anos.

Apesar da carbonatação não ser um processo corrosivo, ele certamente contribui para a deterioração de diversas estruturas de concreto armado, sendo comum o aparecimento de eflorescência do carbonato de cálcio na superfície do concreto como sinal evidente desse processo (RIBEIRO, 2014).

2.6.1.1. Fatores influentes na Carbonatação

Vários são os condicionantes que interferem na velocidade e profundidade da carbonatação. Esses condicionantes são ligados basicamente a dois fatores: os fatores ambientais e as características do concreto. A Tabela 7 mostra os fatores condicionantes e as características influenciadas (FIGUEIREDO, 2005).

Tabela 7 - Principais fatores que condicionam a velocidade de penetração da frente de carbonatação.

	Fatores Condicionantes	Características Influenciadas
Condições de Exposição	Concentração de CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ● Mecanismo físico-químico ● Velocidade de Carbonatação
	Umidade Relativa do ar	<ul style="list-style-type: none"> ● Grau de saturação dos poros ● Velocidade de Carbonatação
	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> ● Velocidade de Carbonatação
Características do Concreto	Composição química do cimento	● porosidade da pasta carbonatada
	Características do clínquer	● reserva alcalina
	Teor de adições	
	Traço	● porosidade
	Qualidade de execução	● porosidade
	Defeitos	● grau de hidratação
Cuidados com a cura		

Fonte: KAZMIERCZAK (1995) apud FIGUEIREDO (2005, p.832).

2.6.1.1.1. Fatores Ambientais

São três os fatores ambientais envolvidos na carbonatação, quais sejam, concentração de CO₂, a umidade relativa do ambiente e a temperatura.

Segundo o CEB/BI 148 (1982) citado por Figueiredo (2005), as maiores taxas de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa do ar se situa entre 50% e 60%, enquanto que segundo a BRE Digest 263 (1982) também citado por Figueiredo (2005) aponta que esse avanço do grau de carbonatação acontece no intervalo entre 50% e 75% da umidade relativa do ar. Por outro lado, em umidades inferiores a 20% e superiores a 95% a carbonatação ou não acontece ou acontece de forma muito lenta (FIGUEIREDO, 2005).

A relação da umidade com a profundidade de carbonização é muito complexa devido aos ciclos constantes de umedecimento e secagem que as estruturas estão expostas. Na verdade, a carbonatação avança a depender da quantidade de água nos poros do concreto, e isso depende da umidade relativa. Como a frente de carbonatação avança em função da existência conjunta da água e do CO₂ nos poros do concreto, quando os poros do concreto estão secos a reação de carbonatação não ocorre, devido à ausência da água. O mesmo acontece quando os poros do concreto estão completamente preenchidos com água, uma vez que o CO₂ se difunde com baixa velocidade nesse meio e, portanto, a frente de carbonatação não avança. A

frente de carbonatação avança, dessa maneira, quando os poros do concreto estão parcialmente preenchidos com água, pois contém os dois fatores essenciais para sua difusão (FIGUEIREDO, 2005).

Em regiões muito povoadas, os gases ácidos são dissolvidos na água da chuva deixando-a com característica ácida, essas chuvas precipitam sobre o concreto e impregna sua superfície, colaborando para a redução da alcalinidade e contribuindo para acelerar a velocidade da carbonatação. Em regiões industriais essas chuvas podem chegar a pH da ordem de 3 a 4, sendo muito agressiva para as estruturas de concreto (HELENE, 1993).

Também em ambientes marinhos, urbanos e industriais as partículas em suspensão são depositadas por impactação nas superfícies das estruturas de concreto, penetrando por difusão e capilaridade, e contribuindo para retenção de água, acarretando na acidificação e neutralização da superfície inicialmente alcalina do concreto (HELENE, 1993).

Ainda segundo Helene (1993), a temperatura também tem grande influência nas reações químicas e isso deve ser levado em consideração na durabilidade das estruturas. Esse fato implica que as deteriorações químicas que ocorrem em estruturas situadas em países de clima equatorial e tropical são bem mais graves e mais intensas que as situadas em países temperados.

Pequenas variações de temperatura têm pouca influência no avanço da carbonatação, enquanto que em temperaturas elevadas a velocidade de carbonatação tende a avançar, com exceção dos casos em que a secagem se sobressai ao efeito da temperatura (NEVILLE, 2015).

O outro fator ambiental influente na velocidade e profundidade de carbonatação é a concentração de CO₂. Conforme afirma Figueiredo (2005) o avanço da frente de carbonatação aumenta quando o ambiente possui uma maior concentração de CO₂, e esse fato é potencializado para concretos com elevadas relações água/aglomerante.

Geralmente o processo de carbonatação é lento pois as concentrações de CO₂ na atmosfera são baixas em ambientes urbanos. Segundo afirma Helene (1993), a concentração em volume de CO₂ na atmosfera é da ordem de 0,03% a 0,05% em ambiente rurais, enquanto que varia de 0,1% a 1,2% em ambientes de tráfego pesados.

2.6.1.1.2. Características do Concreto

De acordo com Ribeiro (2014), algumas condições relacionadas a qualidade inadequada do concreto são facilitadoras da carbonatação, quais sejam, relação água/cimento elevada, cura inadequada, baixa quantidade de cimento, baixos cobrimentos, além de ciclos de secagem e umedecimento. E essas condições beneficiam a velocidade de carbonatação. Adicionalmente é possível destacar ainda o tipo concreto e a qualidade de execução do mesmo.

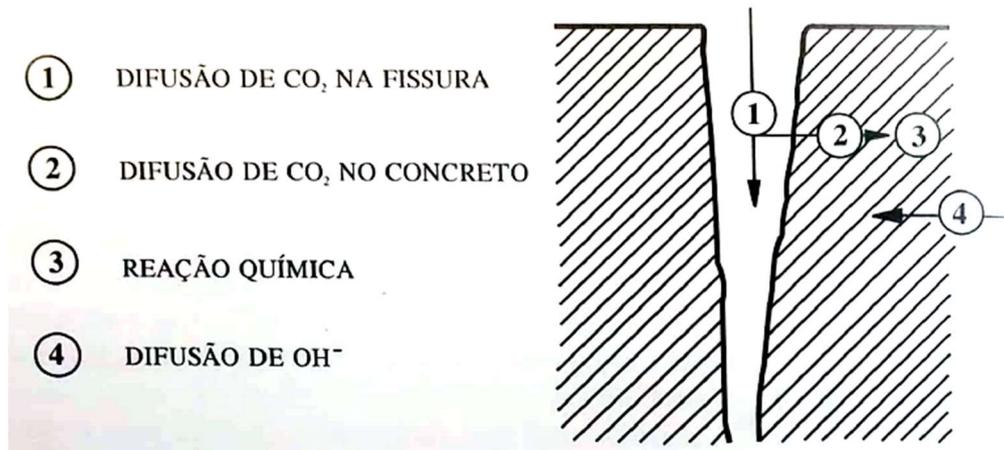
Como a carbonatação do concreto depende da permeabilidade e essa varia com a relação água/ cimento e com uma cura eficiente, pode-se concluir que concretos com elevada relação água/cimento e com cura mal executada terão um avanço maior na penetração da carbonatação, ou seja, maior será a profundidade de carbonatação (NEVILLE e BROOKS, 2013).

O grau de hidratação do cimento será maior quanto maior for o tempo de cura e mais eficiente for o método da cura, isso proporcionará menor porosidade e permeabilidade e, por conseguinte será menor a carbonatação (FIGUEIREDO, 2005).

Também falhas de execução podem causar transformação na estrutura do concreto endurecido, a saber, os ninhos de concretagem, fissuras, perdas da pasta de cimento, etc., causando a aceleração da frente de carbonatação, em virtude da heterogeneidade do concreto (ARAUJO, 2009).

O gás carbônico pode penetrar no interior do concreto mais aceleradamente por meio das fissuras, conforme é possível observar na Figura 7. Porém, dependendo da espessura dessa fissura e da quantidade de íons e de água no interior dela, pode ocorrer o acúmulo de carbonato na superfície da fissura, fenômeno conhecido como autocicatrização da fissura (FIGUEIREDO, 2005).

Figura 7 - Representação da carbonatação no interior de uma fissura.



Fonte: CEB/BI 152 (1984) apud FIGUEIREDO (2005, p.840).

A penetração do CO₂ nas fissuras é tratada na NBR 6118 (ABNT, 2014), por meio da relação entre a classe de agressividade do ambiente com a abertura característica das fissuras. De acordo com essa norma são permitidas fissuras no concreto armado com valores menores ou igual a 0,4mm em ambientes com classe de agressividade I (Fraca: rural e submersa), enquanto que para ambientes com classe de agressividade II e III (Moderada: urbana e Forte: Marinha e Industrial) são aceitáveis fissuras menores ou igual a 0,3mm e por fim para classe de agressividade IV (Muito Forte: Industrial e Respingos de Maré) são aceitas apenas fissuras com valores menores ou igual a 0,2mm. Portanto, coerentemente, quanto maior a classe de agressividade do ambiente (maior penetração de CO₂) menores devem ser os valores-limites aceitáveis para abertura característica (w_k) das fissuras no concreto armado.

É cada vez mais comum as adições ativas e inertes ao clínquer do cimento Portland afim de melhorarem as propriedades do concreto, tais como, reduzir a permeabilidade e porosidade, aumentar resistência mecânica, etc. Porém, alguns trabalhos experimentais mostram a grande influência dessas adições no avanço da frente de carbonatação, aumentando-a (HELENE, 1993).

Assim, concretos sem adições apresentam melhor desempenho no que se refere a resistência a carbonatação, em igualdade de condições de ensaio (FIGUEIREDO, 2005). Segundo Kazmierczak (1995) citador por Figueiredo (2005), essa diminuição da resistência à carbonatação em concreto com adições (escória, cinza volante e casca de arroz) se justifica em razão da perda de reserva alcalina que

essas adições propiciam, pois quanto menores os teores de álcalis maior será a velocidade de penetração da frente de carbonatação devido às reações com o CO₂ dissolvido na fase aquosa dos capilares.

Todavia, essa afirmação não é válida para adições de sílica ativa e metacaulinita, uma vez que propiciaram melhores ganhos de desempenho no concreto, isso porque as alterações na microestrutura causadas por essas adições foram mais eficientes do que a perda de reserva alcalina responsáveis pelo avanço da frente de carbonatação (ARAUJO, 2009).

Como a velocidade e avanço da carbonatação também depende da cura de forma intensa e direta, visto que essa afeta de forma significativa as condições de hidratação dos primeiros milímetros superficiais do concreto, a aparente desvantagem do cimento com adições pode ser reduzida com uma boa e prolongada cura úmida (HELENE, 1993).

Em contrapartida, segundo Helene (1993), o uso de aditivos redutores de água, plastificantes, retardadores e superplastificantes não influenciam diretamente a carbonatação como acontece com as adições. Essa influência só se faz perceber de forma indireta com a redução da relação água cimento, aumento do grau de hidratação, melhoria do adensamento, entre outros.

Conforme afirma Gastaldini et al. (1999) citado por Figueiredo (2005) o desempenho do concreto quanto a carbonatação está condicionado ainda com o modo como é feita a incorporação da adição, se por substituição ou adição, e com teor utilizado.

Além disso, a bibliografia indica que a profundidade de carbonatação está diretamente relacionada com o aumento da quantidade de cimento por metro cúbico, na proporção inversa, ou seja, quanto maior a quantidade de cimento por metro cúbico, menor será a profundidade de carbonatação (FIGUEIREDO, 2005).

2.6.1.2. Medidas preventivas e mitigadoras da Carbonatação

A partir da abordagem já realizada sobre o processo de carbonatação é possível propor algumas medidas preventivas a fim evitar ou postergar o processo de avanço da carbonatação nas estruturas de concreto. Entre as medidas destacam-se:

- Especificar maiores cobrimentos para as estruturas de concreto, principalmente em regiões de ambientes agressivos;
- Especificar baixa relação água/cimento (abaixo de 0,50) a fim de obter concretos menos porosos e mais impermeáveis, principalmente também em áreas sujeitas a meios externos agressivos;
- Especificar o traço do concreto com consumos elevados de cimento, pois quanto maior o consumo de cimento por metro cúbico menor a permeabilidade e porosidade e, portanto, menor a penetração de agentes agressivos;
- Especificar concretos sem adições de escória, cinza volante e casca de arroz, pois colaboram com o avanço da frente de carbonatação. Porém, pode-se utilizar sílica ativa e metacaulinita que é positiva para prevenir a carbonatação.
- Realizar adequado adensamento, afim de melhorar a qualidade final do concreto;
- Curar adequadamente as estruturas de concreto, no mínimo por 7 dias.
- Aplicação de proteção superficial, por meio da aplicação de tintas, vernizes, aplicação de silicones hidrofugantes, assim como camadas de argamassa, revestimentos cerâmicos, etc. Vale ressaltar que a aplicação de proteção superficial sobre concreto é um método preventivo e mitigador adequado não só para o processo de avanço da frente de carbonatação como para todos os mecanismos de degradação que se desenvolvam a partir da penetração de agentes agressivos a partir do meio externo.

2.6.2. Ataque por Cloretos

Os íons cloretos, geralmente presente em ambientes marinhos e em poluentes ambientais, ao penetrar na estrutura do concreto têm a capacidade de destruir a camada passivadora de óxido de ferro que protege a armadura causando a reação anódica de solubilização do Fe^{++} , ou melhor, causando a corrosão (FUSCO, 2008).

As estruturas de concreto que se localizam nesses meios agressivos têm forte tendência a serem atingidas pela corrosão decorrente da ação dos cloretos. Além disso, o concreto tem propensão a conservar mais umidade na presença de grandes

quantidades de cloretos, amplificando o risco de corrosão pela diminuição da resistividade elétrica do concreto (REIS, 2001).

As pesquisas na área com frequência indicam a corrosão da armadura por ataque de íons cloretos como sendo um dos problemas mais sérios que o concreto armado sofre ao longo da sua vida útil (FIGUEIREDO, 2005).

Os íons cloretos que ingressam nas estruturas de concreto podem estar presentes a partir da sua incorporação na fase de mistura e preparação, por meio de: uso de aditivos químicos à base de cloreto de cálcio, como é o caso de aceleradores de pega que contém CaCl_2 ; uso de água salobra na mistura; e uso de agregados (areia e brita) de natureza ácida ou contaminados pelo meio ambiente (KOPSCH, 2001).

Os íons cloreto ainda podem ingressar na estrutura do concreto por meio do transporte por sua estrutura poroso através da sua superfície exposta em um meio agressivo, tais como atmosfera marinha (maresia), água do mar (estrutura “*off shore*”), processos industriais (etapa de branqueamento de indústrias de celulose e papel, por exemplo) e sais de degelo (FIGUEIREDO, 2005).

Algumas fontes íons cloretos são resumidos e apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Fontes de cloretos no concreto.

Fontes Externas	Cloretos adicionados à massa de concreto
Maresia ou névoa de ambiente marinho	Aditivos aceleradores de pega a base CaCl_2
Água do mar (zonas de respingo e variação de maré)	Uso de água contaminada no amassamento
Sais de degelo	
Processos industriais	Agregados contaminados
Solos Contaminados	
Lavagens com ácido muriático	

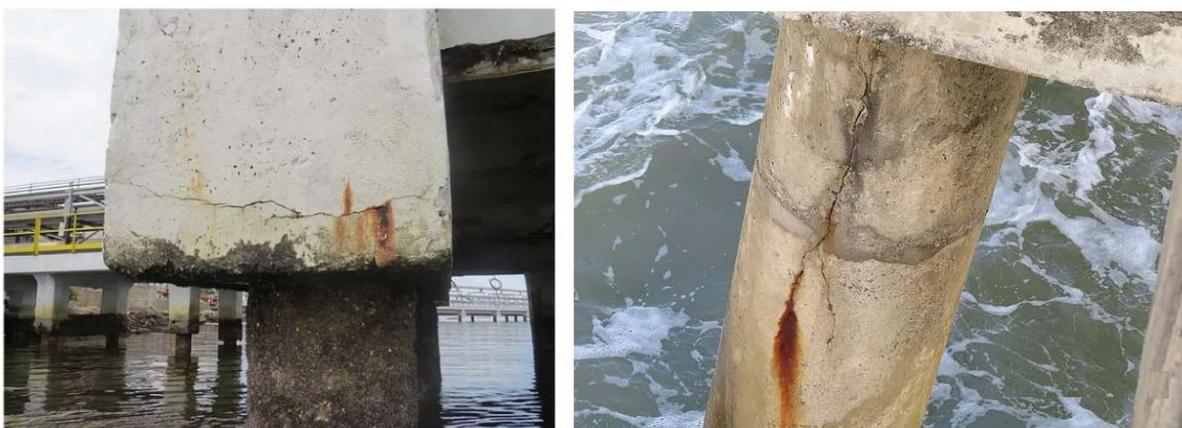
Fonte: VEIRA (2003) apud XAVIER (2010, p. 24).

É sabido que grande parte dos ataques por cloretos no Brasil ocorrem em zonas costeiras, pois as partículas da água do mar contendo sais dissolvidos ficam em suspensão na atmosfera e levadas pelo vento são depositadas nas superfícies das

estruturas, penetrando no concreto e causando corrosão da armadura. Esse processo se agrava com ciclos alternados de umidificação e secagem por água de cloretos, uma vez que com os ciclos sucessivos a concentração de íons vai aumentando progressivamente agravando ainda mais a situação das estruturas já atingidas.

Na Figura 8 é possível visualizar duas estruturas, em ambientes marinhos já atacada pela ação dos cloretos.

Figura 8 - Estruturas comprometidas pelo ataque de cloretos em região marinha.



Fonte: SILVA (2017).

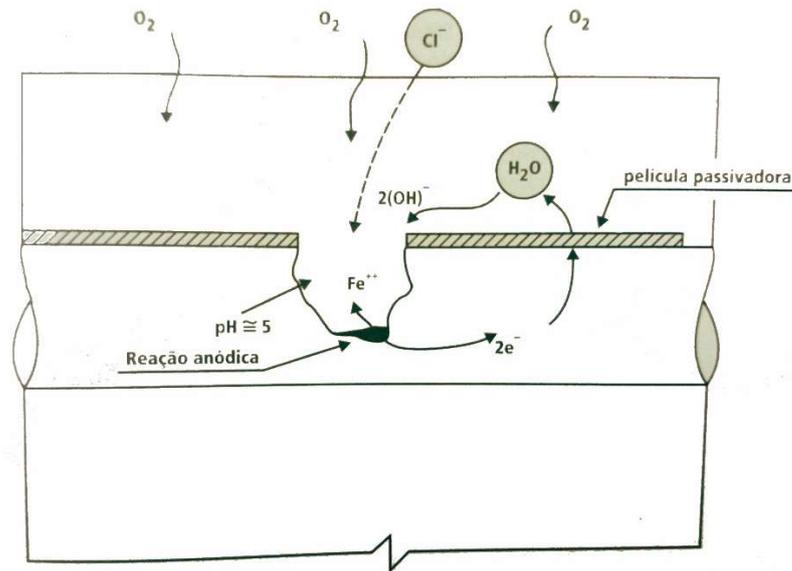
Segundo afirma Cascudo (1997) citado por Lorenzini (2006) existem quatro mecanismos de transporte dos íons cloretos para o interior do concreto, quais sejam: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica. Porém, de acordo com Lorenzini (2006), de forma geral os mecanismos de transportes dos íons cloretos ocorrem por absorção capilar na camada superficial do concreto (ciclos de molhagem e secagem) e por difusão iônica no interior do concreto. Em resumo, conforme explica Ribeiro (2014), o processo de ingresso dos cloretos na estrutura do concreto pode ser explicado pela ação de um mecanismo duplo, primeiro de sucção e depois por difusão.

Para que ocorra o ataque do concreto com íons cloreto é necessário que o íon esteja dissolvido em água, pois como cristal sólido, o cloreto não oferece risco as estruturas, uma vez que não conseguem penetrar nos poros de tamanho reduzido do concreto. Todavia, esses cristais de cloretos podem ficar depositados por impactação na superfície do concreto até que a chuva o dissolva (HELENE, 1993).

O efeito da presença de íons cloretos no interior do concreto é a redução de pH em pontos discretos da camada passivadora causando sua destruição. Nesses pontos localizados formam-se pequenas zonas anódicas, enquanto que o restante da

armação consiste em uma grande zona catódica, processando-se, portanto, a corrosão nos pontos anódicos, conforme pode ser demonstrado na Figura 9 (FUSCO, 2008).

Figura 9 - Ação dos íons cloretos na corrosão do aço.



Fonte: FUSCO (2008, p. 55).

O íon cloreto (Cl^-) tem a capacidade de destruir a camada passivadora do aço proporcionada pelo meio alcalino do concreto e acelerar potencialmente a corrosão, sem consumi-lo. Dessa forma, essas reações continuam a se processar sem consumir o íon cloreto (Cl^-), conforme pode ser observado nas Equações 4 e 5, e, portanto, pequenas quantidades desse íon podem causar problemas de corrosão de grandes proporções (RIBEIRO, 2014).



Em virtude de alguns tipos de aditivos conterem o cloreto de cálcio (CaCl_2) na sua composição, a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) é bem clara, proibindo terminantemente o uso de aditivos que contém cloretos na composição de concretos armado e protendido.

Na grande maioria dos regulamentos e normas, a presença de Cl^- (cloreto) nos aditivos é limitada a 0,4% do peso do cimento, uma vez que acima desse valor pode

ocorrer corrosão, na medida que houver a presença de umidade e água (SOUZA e RIPPER, 1998).

Todavia, existem divergências entre o estabelecimento de limites seguros para a concentração de íons cloretos, uma vez que esse limite depende de fatores diversos, tais como: tipo de cimento (finura, teor de gesso, teor de aluminato tricálcio), relação água/aglomerante, teor de umidade, etc (VILASBOAS, 2004). Algumas normas e recomendações apresentam seus valores orientativos de limite de cloreto conforme apresenta a Tabela 9.

Tabela 9 - Teor limite de cloreto para diversas normas.

NORMA	PAÍS	ANO	TEOR DE CLORETOS RECOMENDADO
NBR 6118 (ABNT)	Brasil	2003	Não se reporta ao teor de cloretos
ACI 318-21	USA	2001	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente com cloretos $\leq 0,3\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente normal $\leq 1\%$ em relação à massa de cimento, em ambiente seco $\leq 0,06\%$ em relação à massa de cimento (concreto protendido)
CEB	Europa	1991	
ENV 206	Portugal	1991	$\leq 0,4\%$ em relação à massa de cimento
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JCSE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,6 \text{ kg/m}^3$ de concreto

Fonte: FIGUEIREDO (2005, p. 844).

Apesar da Norma NBR 6168 (ABNT, 2014) também não se reportar ao teor de cloretos limite, a norma NBR12655 (ABNT, 2015) - Concreto de Cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, faz essa referência ao teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto no aporte de cloretos, conforme mostra a Tabela 10. Ressaltando que entre os componentes do concreto não poderá fazer parte os aditivos que contenham cloretos, conforme proíbe a NBR 6118 (ABNT, 2014). Além disso, a norma NBR 15900 (ABNT, 2009) - Água para amassamento do concreto - Parte 1, define os teores máximos de cloreto em água para amassamento, conforme Tabela 11.

Tabela 10 - Teor máximo de íons cloreto para a proteção das armaduras do concreto.

Classe de agressividade (5.2.2)	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl ⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2015, p. 13).

Tabela 11 - Teor máximo de cloreto em água de amassamento.

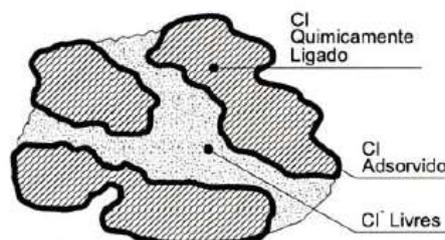
Uso Final	Teor máximo de cloreto mg/L	Procedimento de ensaio
Concreto protendido ou graute	500	ABNT NBR 15900-6
Concreto armado	1 000	
Concreto simples (sem armadura)	4 500	

Fonte: NBR 15900 (ABNT, 2009, p. 6).

As pesquisas realizadas por Hausmann (1967) citado por Ribeiro (2014) apontam que a quantidade necessária de íons cloretos para despassivar o aço se relaciona com a concentração de íons hidróxido presentes nos poros do concreto. E quando a concentração de íons cloreto excede em 0,6 a concentração de íons hidróxido, a camada passivadora é destruída.

O cloreto pode se apresentar em três formas no concreto: quimicamente ligado ao aluminato tricálcico (C₃A), adsorvido na superfície dos poros e sob a forma de íons livres, conforme apresenta a Figura 10. Todavia, não é o teor total de cloretos que interessa para corrosão, apenas os íons livres que se deslocam de um local para o outro são capazes de destruir a película passivadora da superfície do aço, e iniciar o processo de corrosão (FERREIRA, 2000).

Figura 10 - O cloreto no interior do concreto.



Fonte: CASCUDO (1997) apud LORENZINI (2006, p. 17).

Ainda que seja muito grande a capacidade de qualquer concreto se ligar quimicamente ou adsorver fisicamente aos íons cloreto, a propensão é de existir um estado de equilíbrio entre as três formas de disposição, e por isso, sempre existirá algum teor de íons livres de cloreto na fase líquida do concreto (CASCUDO *apud* LORENZINI, 2006).

A carbonatação também exerce um papel fundamental no que se refere ao processo de corrosão pela ação de íons cloretos, uma vez que colabora para aumentar a concentração de íons livres de cloreto na fase líquida dos poros do concreto, sendo estes seriamente danosos ao aço (LORENZINI, 2006).

A principal forma de determinar o teor de cloretos ou a frente de alcance de íons cloreto é por meio de ataque ácido. Outro método é das tiras sensíveis ao cloreto ou ainda o método dos eletrodos dedicados ou sensíveis aos íons cloreto, ambas utilizadas no campo. Todavia, o método dos eletrodos é mais eficaz que o método das tiras, mesmo embora os resultados devem ser confirmados em laboratório para melhor confiabilidade (RIBEIRO, 2014). Outro método factível de ser utilizado é o de aspersão de Nitrato de Prata (AgNO_3) para determinar a penetração do íon cloreto (FIGUEIREDO, 2005). Esse último será detalhado no capítulo 3.

No entanto, a maioria dessas técnicas medem o teor de cloreto total e não apenas os teores de cloretos livres, isto é, inclui os cloretos adsorvidos e os quimicamente ligados ao C_3A , mesmo que não contribuindo para o processo de corrosão (RIBEIRO, 2014). O fator positivo é que via de regra as normas e recomendações geralmente se referem a limites para cloretos totais.

2.6.2.1. Fatores influentes na velocidade e profundidade dos íons cloretos

O mecanismo de penetração dos íons cloreto através do concreto depende de uma série de fatores que devem ser considerados, como por exemplo: composição, tipo e qualidade do cimento; relação água/cimento, adensamento e cura; estado de carbonatação do concreto; temperatura; abertura e quantidade de fissuras; efeito específico do cátion que acompanha o íon cloreto; grau de saturação dos poros (umidade ambiental) e concentração de íons cloreto no meio externo (FIGUEIREDO, 2005).

A sensibilidade do concreto aos íons cloreto está relacionada ao hidróxido de cálcio e ao aluminato de cálcio hidratado, isso significa que cimentos com altos teores de hidróxido de cálcio nos produtos de hidratação são mais apropriados, tais como os que contém escória de alto forno e pozolana, em comparação com os cimentos com baixos teores (RIBIERO, 2014).

Conforme com os estudos de Bakker (1988); Page, Short e Holden (1986); e Rasheeduzzafar et al. (1990) citados por Figueiredo (2005) a quantidade de aluminato tricálcio (C_3A) é que determina a capacidade de combinação com os íons cloretos. Assim, os cimentos que baixos teores de C_3A tem pouca capacidade de imobilizar os íons cloreto por meio da formação de um sal insolúvel complexo conhecido como Sal de Friedel (cloroaluminato de cálcio hidratado), colaborando com a redução da concentração de íons cloreto livres na solução aquosa dos poros do concreto.

Dessa forma, os cimentos que apresentam adições quando submetidos aos íons cloretos apresentam comportamento contrário aquele apresentando aos submetidos a carbonatação, ou seja, influenciam de forma positiva na capacidade de resistência a penetração dos cloretos, freando a penetração dos íons (FIGUEIREDO, 2005).

As adições que apresentam melhor comportamento com relação a penetração dos íons cloretos reduzindo sua difusão são a sílica ativa, a adição de escória e cinza volante quando comparados com o cimento portland comum e o cimento resistente a sulfatos. Esse último por apresentar baixos teores de aluminato tricálcio (C_3A) apresenta um maior coeficiente de difusão dos íons cloretos na estrutura porosa da pasta de cimento, influndo de forma negativa no ataque por cloretos, conforme apresenta a Tabela 12 (FIGUEIREDO, 2005).

Tabela 12 - Coeficiente de difusão de cloretos, a 25°C, em pasta de cimento com a/c igual a 0,5.

Tipo de Cimento	Coeficiente de difusão x 10⁻⁹ (cm²/s)
Cimento Portland	44,7
Cimento com 30% de cinza volante	14,7
Cimento com 65% de escória	4,1
Cimento resistente a sulfatos	100,0

Fonte: MEIRA (2004) apud FIGUEIREDO (2005, p. 846).

Também conforme Mangat e Molloy (1992) citado por Figueiredo (2005) em estudos sobre a ação do cloreto na corrosão concluíram que a quantidade de cimento possui relevância insignificante sobre a despassivação.

A penetração dos íons cloretos também tem relação com a permeabilidade e porosidade. Alguns estudos demonstram que a diminuição na distribuição do volume de poros na matriz cimentícia em função da utilização de agregados mais finos e das adições minerais reduzem de forma relevante a penetração dos íons cloretos, já que uma redução no tamanho dos poros dificulta a difusão desses íons e conseqüentemente melhora a resistência ao ataque por cloretos (RIBEIRO, 2014).

Como a permeabilidade e porosidade tem grande influência sobre a difusão dos íons cloretos, conseqüentemente a relação água/cimento tem papel fundamental para garantir estruturas mais resistentes ao ataque de cloretos. Em estudos realizados verificou-se que os efeitos de diferentes relações água/cimento e diferentes tipos de cimento para períodos curtos de exposição foi restrito à camada superficial do concreto, enquanto que em períodos mais longos de exposição, o tipo de cimento apresenta maior influência na penetração de cloretos que a relação água/cimento (GJORV e VENNESLAND *apud* FIGUEIREDO, 2005).

Como as condições de cura influem e modificam os poros da estrutura dos poros da pasta de cimento conseqüentemente também modificam a porosidade. Concretos com período de cura mais curto apresentam mais cloretos que concretos com cura mais prolongada, sendo essa diferença menos significativa nas camadas mais internas do concreto, ou seja, diminui com a profundidade da camada de recobrimento (FIGUEIREDO, 2005).

Portanto, a espessura da camada de recobrimento do aço é um elemento importante no controle do transporte dos íons cloreto, pois quanto maior for o recobrimento, maior será o intervalo de tempo necessário para que determinada concentração de íons cloreto atinja a superfície do aço. Desse modo, a qualidade do concreto e a espessura do recobrimento trabalham juntos na proteção do aço (FERREIRA, 2000).

Como já mencionado, o transporte dos íons cloretos para o interior do concreto só acontece com a presença de água. Em águas estagnadas (meios não saturados) a penetração se dá por difusão e o coeficiente de difusão é reduzido de forma relevante com a redução do grau de saturação dos poros da estrutura. Já em ambientes com ciclos de secagem e umedecimento, como é o caso de ambientes marinhos, o transporte se dá por sucção capilar da água e a concentração de íons cloretos alcançam graus elevados devido a ascensão capilar e sua subsequente evaporação (FIGUEIREDO, 2005). Já em concretos imersos em águas permanentemente, os cloretos penetram até profundidades consideráveis, no entanto é necessário a presença de oxigênio para que o processo de corrosão venha a se desenvolver (FERREIRA, 2000).

O tipo de cátion envolvido no processo de difusão é um elemento fundamental no teor de penetração de cloretos, dado que esse teor depende do tipo de sal que contém o cloreto e da quantidade de cloreto que são fixados. Por exemplo, as estruturas em que os cloretos são provenientes de CaCl_2 são mais afetadas pela corrosão, mesmo contendo menores quantidade de cloretos livres e menor relação $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$, que os provenientes de NaCl em mesma quantidade (FIGUEIREDO, 2005).

As aberturas e quantidades de fissuras são outros fatores influentes no avanço dos cloretos para o interior do concreto, visto que elas facilitam a penetração e obviamente serão as primeiras regiões a serem atingidas pelo processo de corrosão, pois formar-se-á uma zona anódica no interior das fissuras e uma região catódica fora delas. Portanto, a velocidade de penetração dos íons cloretos vai depender tanto das fissuras existentes como da qualidade do concreto da estrutura (FIGUEIREDO, 2005).

Uma das causas mais severas de corrosão é a combinação dos efeitos da carbonatação com os cloretos, conjuntamente eles aceleram de forma elevada o processo de corrosão em comparação com cada uma atuando separadamente na estrutura (FIGUEIREDO, 2005). Dessa forma, a carbonatação desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da corrosão pela ação dos cloretos, dado que

contribui para o aumento da concentração de cloretos livres na solução dos poros do concreto, sendo estes potencialmente prejudiciais ao aço das estruturas (LORENZINI, 2006).

Do mesmo modo é o papel da temperatura no ataque por cloretos, ela afeta a penetração de Cl^- , proporcionando com seu aumento, o aumento na penetração de Cl^- (AL-KHAJA *apud* FIGUEIREDO, 2005).

2.6.2.2. Medidas Preventivas e mitigadoras do ataque por cloretos

Algumas medidas preventivas e mitigadoras podem ser tomadas para evitar ou retardar a penetração dos íons cloretos para o interior do concreto em meios mais agressivos. Destaca-se a seguir algumas dessas medidas:

- Especificar maiores cobrimentos para as estruturas de concreto, principalmente em regiões de ambientes agressivos;
- Produção de concretos mais densos, gerando um concreto com baixa porosidade e permeabilidade. Isso significa, a produção do concreto com uma baixa relação água/ cimento e utilização de processos de cura e adensamento adequados;
- Deve ser utilizado cimento com adições, tais como cimento com adição de escória de alto forno ou com adição de material pozolânico;
- Uso de adições ao concreto tal como a sílica ativa, pois permite a redução da difusidade dos íons cloreto na pasta;
- Uso de cimento com alto teor de C_3A , pois também reduz a difusidade dos íons cloreto na pasta;
- Controle e tratamento das fissuras existentes, pois as fissuras facilitam a entrada dos íons cloreto para o interior do concreto;
- Controle de acesso de água ao concreto endurecido, já que o transporte dos íons só ocorre na presença de água ou umidade. Isso pode ser melhorado com a adoção de medidas de proteção superficial do concreto, tais como, pinturas e/ou revestimentos sobre as estruturas;
- No recebimento de material deverá ser determinado, por meio de ensaios, os teores de cloretos em concretos, agregados e águas de amassamento,

rejeitando-os caso ultrapasse os limites estabelecido em norma conforme Tabelas 10 e Tabela 11 já apresentadas nessa secção, e na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 - Teor máximo de cloretos no agregado.

Determinação	Método de ensaio	Limites
Teor de cloretos ^a (CL)	ABNT NBR 9917 ABNT NBR 14832 ^b	< 0,2 % concreto simples
		< 0,1 % concreto armado
		< 0,01 % concreto protendido

Fonte: Adaptado da NBR 7122 (ABNT, 2009, p. 6).

2.6.3. Ataque por Sulfatos

O ataque por sulfatos é um fenômeno associado a reações químicas que envolvem formação de produtos expansivos que levam a efeitos danosos às estruturas de concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Esse ataque está associado à interação entre a pasta de cimento hidratada com os íons sulfatos, contudo pode manifestar-se de maneiras diversas e dependerá da origem dos íons sulfatos, que pode ser tanto interna ao concreto como externa (SOUZA, 2006).

De acordo com Silva (1998) citado por Aguiar (2006) os sulfatos podem ter origem nos materiais que o compõe o concreto ou no contato do concreto com os solos ou águas ricas com este agente, podendo penetrar desde o exterior por difusão iônica ou por sucção capilar. O ataque produzido por sulfatos é devido a sua ação expansiva, que pode gerar tensões capazes de fissurá-lo. Os sulfatos podem estar também na água de amassamento, nos agregados ou no próprio cimento.

O sulfato é encontrado em todos os tipos de solo, na forma de gipsita, porém em quantidades não nocivas ao concreto. As concentrações elevadas de sulfatos são encontradas em águas subterrânea e são decorrentes de sulfatos de cálcio, magnésio e amônia. Ainda, não é difícil encontrar concentrações elevadas de sulfatos em água naturais e industriais (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Segundo Souza (2006) outras fontes de sulfatos no ataque as estruturas de concreto, argamassas ou outros produtos de base cimentícia, além dos solos contendo gipsita, são os provenientes de meios agressivos como a água do mar, água

pantanosas (com decomposição de matéria orgânica), lençóis freáticos, esgoto, efluentes de indústria, chuvas ácidas e também agregado contendo pirita como constituinte do concreto.

Como efeito da reação química entre os sulfatos e a pasta de cimento hidratada será formada a gipsita e a etringita. Esses produtos são formados em regiões próximas a superfície da estrutura e resultam em fissuras na camada de cobrimentos, reduzindo a proteção natural do aço, e ainda em expansão da pasta de cimento, ambas provocadas pelas tensões internas (SOUZA, 2006). Como resultado da degradação pode ocorrer também a redução gradativa da resistência mecânica, além de perda de massa em função da perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Conforme resume Souza (2006), o processo completo de deteriorização por sulfatos abrange três estágios, a saber: (a) a penetração dos íons sulfatos por difusão para o interior da pasta de cimento; (b) as reações entre os compostos da pasta hidratada com os íons sulfatos formando etringita e gipsita; (c) fissuração da pasta acarretando em perda de resistência e desintegração.

O hidróxido de sódio da pasta do cimento hidratada quando entra em contato com os íons sulfatos convertem ambos os hidratos que contém alumina em etringita. Da mesma forma, tanto o hidróxido de sódio quando o C·S·H presentes na pasta de cimento hidratada, a depender do tipo de cátion associado a solução de sulfato (Na^+ , K^+ ou Mg^{2+}), se convertem em gipsita.

Quando em estado sólido os sulfatos não são agressivos ao concreto, apenas em solução os sulfatos de magnésio, cálcio, potássio e amônia reagem com a pasta de cimento endurecida e são prejudiciais ao concreto levando a sua degradação (BRANDÃO, 1998).

De acordo com Souza (2006), alguns fatores podem influenciar em maior ou menor grau na degradação do ataque por sulfato. São eles: permeabilidade e porosidade; geometria; concentração de cimento; concentração da solução de sulfato; pH e temperatura; quantidade e a natureza do sulfato presente; o nível de água e sua variação sazonal; o fluxo de água subterrânea e a porosidade do solo; a forma da construção; e a qualidade do concreto.

É possível propor e elencar as medidas preventivas a fim de evitar ou mitigar esse tipo de ataque, tais como: produzir concretos com baixa permeabilidade, com baixa relação água/ cimento, espessuras de cobrimentos adequadas, alto consumo de cimento e adensamentos e curas apropriadas; uso de cimento de alto forno com teor

de escória superior a 60% no concreto; ou uso de cimento pozolânico com teor de pozolana entre 15% e 25% no concreto; ou uso de cimento resistente a sulfatos no concreto; uso de cimento com baixo teor de álcalis; uso de água de amassamento com teor de sulfato menor que 2000 mg/L no concreto, conforme indica a NBR 15.900 (ABNT, 2009); utilizar agregados para fabricação de concreto com teor de sulfato menor que 0,1%, conforme prescrição da NBR 7122 (ABNT, 2009); e, caso necessário, utilizar medidas de proteção superficial do concreto, tais como pinturas, revestimento de argamassa, revestimento cerâmico, entre outros.

2.6.4. Reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química que ocorre dentro do concreto entre certos minerais reativos do agregado e os íons alcalinos (K^+ , Na^+) e os íons hidroxilas (OH^-) presentes em solução na pasta de cimento. Portanto, de forma diferente dos outros tipos de ataques ao concreto, a degradação causada pela reação álcali-agregado não é proveniente da ação de agentes agressivos do meio externo (RIBEIRO, 2014).

Essa reação não acontece de forma significativa sem a presença de água, mesmo que o concreto contenha agregados reativos e álcalis com mobilidade na pasta, sendo necessária a exposição contínua de umidade relativa, que deve ser no mínimo de 80% (RIBEIRO, 2014).

A resultante dessa reação é um gel expansivo, que pode provocar expansão, movimentações diferenciais nas estruturas e fissuração, exsudação de gel e redução da resistência à tração e compressão (PRISZKULNIK, 2005). Segundo Mehta e Monteiro (2008), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer o concreto, resultando em perda de resistência, elasticidade e durabilidade.

O desenvolvimento de tensão interna causada pela reação álcali-agregado, entre outros fatores, varia com a dimensão e tipo do agregado reativo, além da composição química do gel expansivo formado. Porém, a maioria dos casos em que ocorre a reação álcali-agregado está associado a partículas reativas na granulometria da areia, especialmente na faixa entre 1 a 5 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Além disso, para que ocorra o RAA é necessário que o agregado contenha formas de sílica reativa capaz de reagir com os íons hidroxila e os álcalis presentes na solução, como: vidro vulcânico, sílica amorfa, sílica microcristalina, tridimita, cristobalita, calcedônia, opala, quartzo e feldspato deformados (RIBEIRO, 2014).

Basicamente existem três tipos de reação álcali-agregado, são elas: a reação álcali-sílica, a reação álcali-silicato e a reação álcali-carbonato.

A reação álcali-sílica (RAS) é a mais preocupante e ocorre entre a sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais e os íons hidroxilas originários da dissociação dos hidróxidos alcalinos (PRISZKULNIK, 2005).

Conforme afirma Silva (2007), para que a RAS ocorra é necessário que existam três componentes simultaneamente, quais sejam, uma quantidade de solução alcalina nos poros do concreto, uma proporção de sílica reativa nos agregados e umidade.

Já a reação álcali-silicato se caracteriza como um tipo específico de reação álcali-sílica, em que participam os álcalis e alguns tipos de silicato presentes em certas rochas como o feldspato, folhelhos, argilosos, certas rochas sedimentares (como as grauvacas), metamórficas (como os quartzitos) e magmáticas (como os granitos), e, essencialmente, a presença de quartzo deformado (tensionado) e minerais expansivos (PRISZKULNIK, 2005). Esse é o tipo de RAA mais conhecido no Brasil e tem características específicas como propriedades mais lentas e complexas que as outras reações álcali-agregado.

Já a reação álcali-carbonato (RAC) é a reação que ocorre em concretos produzidos com agregado calcário dolomítico. Basicamente é uma reação onde participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos, sendo que a sua forma mais conhecida de deteriorização é devida a desdolomização da rocha com enfraquecimento da ligação pasta-agregado (SILVA, 2007). A RAC não é tratada na NBR 15577 (ABNT, 2008) – Agregados: Reatividade álcali-agregado – em todas as suas partes, uma vez que até o presente momento não foi relatado casos desse tipo de reação no Brasil, conforme afirma Couto (2008).

O desenvolvimento da RAA pode ser influenciado por diversos fatores dos quais pode-se citar: o teor de álcalis solúveis disponível; a natureza, a quantidade e a dimensão dos agregados reativos; a temperatura do ambiente; a umidade do ambiente; entre outros (COUTO, 2008).

É necessária tomar medidas preventivas antes e após a produção das estruturas a fim de evitar o desenvolvimento de reação álcali-agregado, tais como: evitar o uso de agregados reativos no concreto; uso de cimento pozolânico, cimento de escória de alto forno e material pozolânico adicionado ao concreto (pozolanas, cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz); uso de cimento com baixa alcalinidade (teor de álcalis abaixo de 0,6%) associado a um concreto com

baixo consumo de cimento; e controle de acesso de água ao concreto, pois a reação só ocorre com a presença de água.

2.6.5. Ataque por Ácidos

O ataque ácido é decorrente da reação entre uma solução agressora e os compostos do cimento, com formação de compostos secundários lixiviados pelo concreto, ou que permanecem numa forma não aderente ao concreto, ocasionando a perda de resistência (FERREIRA, 2000). Como consequência da ação do ataque ácido ocorre a desintegração da pasta de cimento, deixando os agregados expostos.

O ataque por ácidos geralmente ocorre em ambientes úmidos com presença de CO₂, de SO₂ e outros gases ácidos presentes no meio ambiente externo que atacam o concreto, e como consequência dissolvem e retiram a parte não resistente aos ácidos da pasta de cimento endurecido (AGUIAR, 2006). Normalmente o hidróxido de cálcio é o elemento mais atingido pelo ataque ácido, apesar de todos os compostos do cimento Portland serem susceptíveis à degradação (FERREIRA, 2000).

É pouco comum a degradação por ácidos capaz de gerar prejuízo severo a pasta de cimento, na prática isso só ocorre em pH abaixo de 6,5 (BRANDÃO, 1998). Entre as soluções ácidas mais agressivas, destacam-se as soluções ácidas inorgânicas de ácido sulfúrico, ácido hidrocloreto, ácido hidrofluórico, ácido nítrico, ácido fosfórico e ácido carbônico, e as soluções ácidas orgânicas, de ácido láctico, ácido acético, ácido fórmico, ácido tânico, ácido cítrico, ácido húmico (FERREIRA, 2000).

Os fatores que influenciam na velocidade de ataque dos ácidos além do pH, que de forma isolada não é um bom indicador do potencial de ataque da solução ácida, são: a presença de CO₂, a solubilidade do sal produzido e a velocidade com que este sal é dissolvido e lixiviado. Dessa forma, a velocidade da degradação será maior em soluções correntes do que em soluções estagnadas. Ainda, o aumento da velocidade de deslocamento do agente agressor, de sua temperatura e de sua pressão contribui para o aumento da intensidade do ataque (BRANDÃO, 1998).

O ataque ácido ocorre com mais frequência em ambientes urbanos e industriais devido à grande quantidade de agentes agressivos da atmosfera. Também, em atmosfera de locais fechados com baixa taxa de renovação de ar as estruturas

também sofrem danos, é o caso da ação do ácido sulfúrico, ácido muito comum na deterioração do concreto, que gera cloretos de esgoto a partir da presença de sulfatos (SO_4) (GAIER, 2005).

Usualmente o ácido envolvido no ataque deposita o produto da reação na superfície do concreto, comumente na forma de sal. O ácido sulfúrico, por exemplo, quando reage com a hidróxido de cálcio da pasta de cimento gera sulfato de cálcio que é disposto como gesso (FERREIRA, 2000).

Como medidas preventivas para o ataque por ácidos destacam-se: o uso de cimento de alto-forno e de pozolanas, pois ajudam o desempenho do concreto; uso de concreto com baixa permeabilidade; uso de proteção superficial sobre as estruturas, com por exemplo pinturas de borracha e betuminosas, resinas epóxicas e outros agentes; minimizar o tempo de exposição do concreto aos ácidos, quando possível, e também evitar imersão; no caso de ambientes de esgoto, deverá ser feita cloração e ventilação da área a fim de evitar a formação de ácido sulfúrico, além de fazer uso de agregados calcários, que reduz a acidez e eleva o pH.

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para verificar o exposto no Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – foram realizados ensaios de laboratório para verificação de algumas alterações químicas no concreto, a saber, a carbonatação e o ataque por cloretos. Os procedimentos adotados serão descritos a seguir.

3.1. Ensaio de laboratório para verificação da carbonatação em estruturas de concreto

Esse método de ensaio consiste em determinar a camada carbonatada na superfície de concretos já endurecidos, utilizando um indicador de pH sintético, a fenolftaleína. Esse indicador permanece incolor em contato com concretos carbonatados e rosa ou avermelhado em contato com concretos não-carbonatados. O pH de mudança de coloração da fenolftaleína ocorre de 8,3 a 10, acima desse valor a superfície torna-se rosada e incolor abaixo dela.

Serão analisados dois corpos de provas de concreto a fim de comparação, um corpo de prova exposto as agressividades do meio ambiente externo e um corpo de prova sem exposição a um meio ambiente externo.

Os materiais utilizados na realização do ensaio são:

- 2 corpos de prova cilíndrico de concreto (Figura 11);
- Solução pronta de fenolftaleína diluída em álcool a 1% (Figura 12);
- Borrifador (Figura 13);
- Paquímetro (Figura 14).

Figura 11 - Dois corpos de prova moldados em Laboratório.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 - Solução pronta de fenolftaleína diluída em álcool a 1%.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 12 - Borrifador.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 14 - Paquímetro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para realização dos ensaios foi necessária a moldagem, em laboratório, de dois corpos-de-prova cilíndricos de concreto. Como foram utilizados corpos de prova já existentes no laboratório de concreto da UFMG, os dois possuíam dimensões distintas, sendo um nas dimensões $\varnothing 10 \times 18$ cm e outro nas dimensões de $\varnothing 10 \times 20$ cm. Para a confecção dos mesmos foram utilizados materiais de construção comumente utilizados nas obras de engenharia da região metropolitana do Belo Horizonte.

Para um resultado mais próximo da realidade, apenas um dos corpos de prova foi exposto às intempéries por um período, fora do ambiente de laboratório, em condições semelhantes às que as estruturas de concreto são expostas ao longo da vida útil.

Anteriormente ao ensaio, ambos os corpos-de-prova tiveram sua superfície rompida ao meio na direção perpendicular ao diâmetro, a fim de que a medida da frente de carbonatação fosse realizada na estrutura interna dos corpos de prova.

A solução de fenolftaleína diluída a 1% em álcool foi inserida dentro de um borrifador para ser aspergida sobre a superfície rompida do corpo de prova. Utilizando o borrifador contendo a solução do indicador, molhou-se a superfície de um dos corpos de prova, inicialmente foi utilizado o corpo de prova que ficou exposto as condições do meio ambiente externo. Na Figura 15 é possível observar a aplicação da solução de fenolftaleína sobre a superfície do corpo de prova.

Figura 15 - Aspersão de fenolftaleína no corpo de prova que ficou exposto as intempéries.



Fonte: Elaborada pela autora.

Após alguns minutos passados da aplicação do indicador é possível observar que não há mudança na coloração da superfície do corpo de prova. Isso significa dizer que como nenhuma zona do corpo de prova mudou de coloração, o concreto está completamente carbonatado e caso existisse armadura no seu interior provavelmente a mesma já se encontraria despassivada. Nesse caso, não é necessário fazer a

medida da camada carbonatada visto que não há transição de uma zona carbonatada para uma não carbonatada. Na Figura 16 é possível observar o corpo de prova alguns minutos após a aspersão de fenolftaleína.

Figura 16 - Corpo de prova carbonatado.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em um segundo momento, foi realizado o mesmo procedimento para o corpo de prova não exposto ao meio ambiente externo. Assim, aplicou-se a solução de fenolftaleína com o borrifador sobre a seção rompida do corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Aplicação da solução de fenolftaleína sobre o corpo de prova não exposto as intempéries.



Fonte: Elaborada pela autora.

Já durante a aplicação da solução é possível perceber uma leve coloração rosada na superfície do concreto e após esperados alguns minutos observa-se a intensificação dessa coloração. Assim, após a aplicação da solução é possível observar duas zonas de coloração distintas, a zona carbonatada que se apresenta incolor, e a zona não carbonatada que se apresenta rosada, conforme pode ser observada na Figura 18.

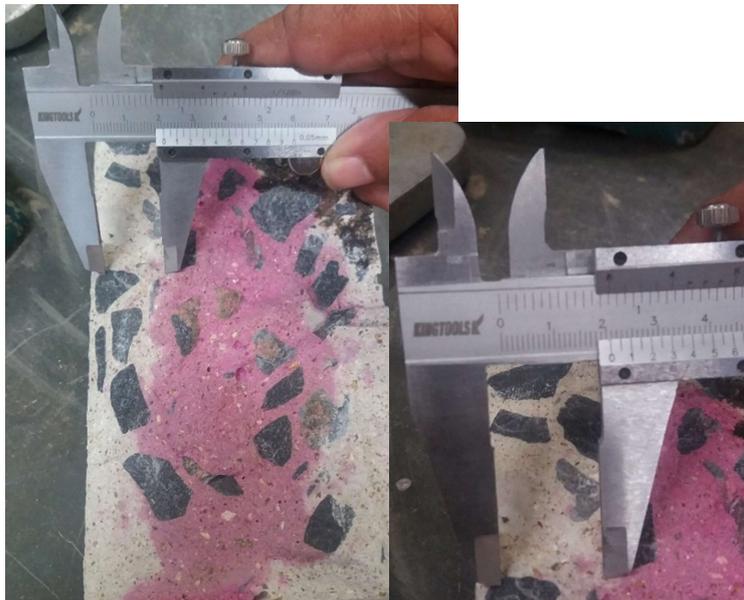
Nesse caso como houve a transição de uma zona para outra é necessária fazer a leitura da camada carbonatada com o paquímetro. Essa medida é realizada da superfície externa do concreto para o interior, podendo ser realizada com a precisão de milímetros, conforme pode ser visualizado na Figura 19. O valor para a frente de carbonatação deve ser o valor médio da espessura da camada incolor. Assim, o valor encontrado para a profundidade de carbonatação desse corpo de prova foi de 20,8 milímetros.

Figura 18 - Corpo de prova após alguns minutos da aspersão de fenolftaleína.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 19 - Imagens da leitura da medida da frente de carbonatação do corpo de prova.



Fonte: Elaborada pela autora.

Nesse ensaio ainda é possível verificar o estado e o diâmetro efetivo da armadura, quando da retirada de um testemunho de uma estrutura real, bem como é possível determinar a espessura efetiva do concreto de cobertura. Assim, é possível acompanhar o avanço da frente de carbonatação até que a armadura seja atingida e ocorra a despassivação e conseqüente avanço da corrosão.

3.2. Ensaio de laboratório para verificação de ataque por cloretos em estruturas de concreto

Esse ensaio consiste em um método qualitativo para identificar a presença de cloretos livres na pasta de cimento endurecida por meio de uma solução de AgNO_3 (Nitrato de prata). Quando a superfície do concreto entra em contato com a solução de nitrato de prata uma reação fotoquímica processa-se, e onde há presença de cloretos livres, que são nocivos às estruturas, ocorre a formação de um precipitado branco de cloreto de prata.

A execução desse procedimento será um ensaio simulado e para aplicação do método foram utilizados os seguintes materiais discriminados a seguir:

- Corpo de prova de concreto (Figura 20);
- Cloreto de sódio ou sal de cozinha (NaCl) (Figura 21);
- Solução de Nitrato de prata 0,1mol/l (AgNO_3) (Figura 22);
- Tubo de ensaio (Figura 22).

Figura 20 - Corpo de prova de concreto



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 21 - Cloreto de sódio ou sal de cozinha (NaCl).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 22 - Solução de nitrato de prata e tubo de ensaio.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para esse procedimento experimental foi confeccionado em laboratório um corpo de prova cilíndrico de concreto nas dimensões de Ø 10x 20 cm. Como o ensaio foi realizado na cidade de Belo Horizonte e esta cidade não apresenta ambiente salino, e, portanto, não apresenta íons cloretos representativos na sua atmosfera, o ensaio foi simulado utilizando-se o cloreto de sódio sobre a superfície do corpo de prova de concreto. Dessa forma, foi depositado uma quantidade de cloreto de sódio sobre a superfície do corpo de prova de concreto, simulando o que ocorre em estruturas expostas a esse tipo de meio agressivo, conforme ilustrado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 - Aplicação de cloreto de sódio sobre a superfície de concreto.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 24 - Cloreto de sódio sobre a superfície do concreto.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em seguida à aplicação do cloreto de sódio foi adicionada sobre o concreto a solução de nitrato de prata a 0,1 mol/l (AgNO_3), conforme pode ser visualizado na Figura 25. É possível observar que uma vez depositada a solução de nitrato de prata sobre o cloreto de sódio da superfície do concreto eles reagem formando um precipitado branco espumoso. A reação entre eles também pode ser representada pela Equação 6.



Figura 25 - Solução de nitrato de prata derramada sobre a superfície do corpo de prova de concreto.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 26 é possível visualizar com mais detalhes o efeito provocado pela reação, que gera uma solução esbranquiçada resultado da precipitação do cloreto de prata (AgCl).

Figura 26 - Precipitado esbranquiçado de cloreto de prata resultado da reação do nitrato de prata com o cloreto de sódio.



Fonte: Elaborada pela autora.

Esse ensaio tem como característica a detecção da presença dos cloretos, porém não quantifica os seus teores. Assim, esse ensaio pode comprovar se a despassivação e a corrosão das armaduras de uma estrutura de concreto ocorreram ou não pela presença de íons cloretos.

4 ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo será apresentado um estudo de caso de uma edificação com estrutura de concreto armado comprometida pelas manifestações patológicas por alteração química situada na cidade de Salvador/ BA.

O objetivo desse estudo de caso consiste na inspeção e no diagnóstico das condições da estrutura, não incluindo, nesse caso, ações de intervenção e reabilitação da estrutura.

4.1. Metodologia

Conforme mencionado no Capítulo 1, no item 1.2 - Limitações do Trabalho - o estudo de caso será baseado apenas na análise de informações e análise visual, não sendo possível a realização de quaisquer ensaios experimentais para verificação dos mecanismos que afetou as estruturas, sejam eles destrutivos ou não destrutivos. Assim, os ensaios serão apenas recomendados.

4.2. Contextualização

A análise a ser feita nas estruturas da edificação em questão irá avaliar os componentes de concreto armado que foram atingidos por patologias, e irá identificar as possíveis patologias e mecanismos de deterioração que acometeram a estrutura, além disso serão feitas recomendações necessárias para sanar os problemas.

A edificação a ser analisada se localiza na cidade de Salvador e foi construída em 1970, funcionando atualmente como o escritório de uma empresa. O prédio se caracteriza como uma edificação com estrutura de concreto armado, constituído de pilares, lajes e vigas. Conforme informado pelo representante da empresa as patologias começaram a se manifestar a cerca de 10 anos atrás e foram evoluindo bastante ao longo desses anos. Além disso, foi informado que a edificação passou por uma reforma em 1980, dez anos após a construção. Não foram obtidos os projetos da edificação.

A edificação é composta de 2 pavimentos, sendo um pavimento térreo composto apenas por salas de escritório e um pavimento inferior a ele, localizado na

parte acidentada do terreno, composto por cozinha, vestiários, banheiro e sala. A edificação é composta por varandas em todo seu entorno.

A localização do imóvel é em uma região de vegetação fechada e nas proximidades do mar. Como características climáticas da região tem-se clima quente e úmido. Na Figura 27 é possível verificar o entorno do imóvel e a sua localização em relação ao mar.

Figura 27 - Entorno e proximidade da edificação com o mar.



Fonte: Google Earth Web (acesso em 10 nov. 2017) com adaptação da autora.

4.3. A Vistoria: Inspeção visual

A inspeção das estruturas é de grande importância para o controle de fenômenos patológicos, seja em operação preventivas, seja na terapia do problema. Faz parte da avaliação do problema a inspeção preliminar, constituída basicamente por um exame visual para caracterizar os sintomas, bem como por uma série de ensaios que possam demarcar o problema. Fundamentalmente os métodos visuais visam registrar todas as anomalias presentes e dar uma primeira indicação do problema, todavia não são capazes de fornecer informações suficientes para uma análise mais completa (CASCUDO, 2005).

A vistoria no local ocorreu durante uma tarde e foi verificada que quase a totalidade dos problemas encontrados nas estruturas se localizavam no pavimento inferior, notadamente nas áreas voltadas para a parte externa que se localizam ao fundo da edificação.

Na vistoria houve o contato direto com as manifestações, basicamente utilizando a análise visual e registro fotográfico. Também buscou-se obter informações com os responsáveis sobre o imóvel e seu histórico, e sobre o histórico dos problemas patológicos encontrados.

4.3.1. Danos generalizados nas vigas

Com relação as vigas do imóvel, apenas as do pavimento inferior, que suportam todo o pavimento térreo, apresentam problemas de deterioração. Algumas vigas desse pavimento apresentam processos sérios de deterioração, com as armaduras completamente afetadas pela corrosão. Foram verificadas na estrutura fissuras paralelas às armaduras que estão em processo de corrosão, fragmentação e destacamento do cobrimento, lascamento do concreto em estágio avançado, além de exposição das armaduras, com formação de crosta de ferrugem e inclusive com diminuição da secção.

Como na maioria dos pontos já há o destacamento do cobrimento em grau bem severo não foi possível identificar manchamento ferruginoso na superfície do concreto, apenas algumas manchas de umidade na viga da varanda.

A superfície de uma das vigas voltada para a varanda externa é uma das partes mais afetadas, haja vista a exposição as intempéries. Todavia, a região da cozinha, em especial na área da janela, também apresenta situação de extremo comprometimento da estrutura. Do mesmo modo ocorre no vestiário, que apresenta uma das vigas com danos de magnitude considerável.

Nas imagens apresentadas é possível visualizar cada uma das vigas atingida por manifestações patológicas e por danos generalizados.

As Figuras de 28 a 32 se referem a mesma viga longitudinal da edificação, que se localiza na varanda ao fundo. A Figura 28 mostra a área da viga com deterioração menos preocupante, é possível verificar o destacamento do cobrimento do concreto e a armadura de estribo já exposta na parte anterior, inclusive com a pintura já totalmente prejudicada. Com relação as imagens das Figuras 29, 30, 31 e 32 já é possível visualizar danos mais severos, em que houve lascamento e destacamento de um volume significativo do cobrimento do concreto, além de grande comprometimento das armaduras principais e estribos. É possível verificar redução

significativas das secções das armaduras principais e em algumas imagens como, como por exemplo é o caso da Figura 31 e 32, a quase inexistência da armadura transversal (estribo), visto o avanço no processo de corrosão. Na Figura 33 é possível verificar mais de perto a situação da armadura de um dos pontos da viga, expondo o nível de corrosão do aço.

Figura 28 - Deterioração da viga na área externa (varanda).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 29 - Deterioração da viga na área externa (varanda).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 30 - Danos da viga na área externa (varanda).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 31 - Deterioração da viga na área externa (varanda).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 32 - Deterioração da viga na área externa (varanda).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 33 - Detalhe da armadura da viga da área externa.



Fonte: Elaborada pela autora.

As figuras 34 e 35 se referem a uma mesma viga localizada no vestiário, portanto área interna à edificação. Assim como a viga da varanda, a viga do vestiário apresenta danos relevantes com corrosão avançada. Houve destacamento expressivo de cobrimento do concreto com apresentação de armaduras expostas, e redução de secção tanto das armaduras principais como dos estribos. Além disso, na Figura 35 é possível verificar grandes rachaduras paralelas a armadura principal, resultado provável da corrosão avançada.

Figura 34 - Deterioração da viga na área interna do vestiário.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 35 - Deterioração da viga na área interna do vestiário.



Fonte: Elaborada pela autora

Na imagem da Figura 36 é possível verificar a viga da cozinha, também localizada na área interna do imóvel, e com grau elevado de deterioração. Com a corrosão das armaduras houve lascamento e destacamento significativo do revestimento do concreto o que resultou em armadura exposta e diminuição das secções de armadura principal e transversais. Como a armadura foi totalmente

atacada pela corrosão, provavelmente já não está cumprindo sua função estrutural inicial.

O interessante observar na Figura 36 é que a viga afetada está localizada em uma área interna, além disso é revestida com revestimento cerâmico, e ainda assim sofreu deterioração substancial. Na Figura 37 é possível observar a expansão da armadura em decorrência da corrosão e a quase inexistência de armadura íntegra, com perda total da seção.

Figura 36 - Comprometimento da viga na área interna da cozinha.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37 - Detalhe da armadura da viga da cozinha.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.2. Danos nos pilares

Assim como a viga do pavimento inferior, dois dos pilares do pavimento inferior também estão bastante comprometidos com a corrosão, conforme é possível verificar nas Figuras 38 e 39. As figuras mostram de forma clara o destacamento do revestimento do concreto que ocorreu no pilar, resultado da acentuada corrosão das armaduras. As armaduras expostas também apresentam a crosta de ferrugem e aparentemente perda de seção.

O destacamento também é resultado inicial das fissuras anteriores como consequência da expansão das armaduras do pilar. Ao oxidar-se com o decorrer do tempo a armadura expande seu volume, provocando assim as fissuras externas no pilar e posterior destacamento do revestimento do concreto.

Partindo da premissa que o pilar trabalha submetido a compressão, e que suporta toda a carga da estrutura do pavimento térreo acima dele, e que esse destacamento associado a corrosão provocou uma diminuição da seção transversal do pilar, haverá um ponto vulnerável, propiciando, se não houver um tratamento, o esmagamento do pilar e comprometimento da estrutura.

Visualmente não foi possível verificar flambagem das armaduras longitudinais do pilar pelo decréscimo de seção do concreto.

Não há pilares atingidos por manifestações patológicas no pavimento superior (térreo).

Figura 38 - Deterioração do pilar da varanda.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 39 - Deterioração do pilar da varanda.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.3. Danos nas lajes

As manifestações patológicas também atingiram as lajes, porém nesse caso elas se localizam tanto no pavimento inferior quanto no térreo. Como nas vigas e nos pilares apresenta-se formação de pites de corrosão pela estrutura e lascamento do concreto devido à expansão dos produtos da corrosão nas armaduras, gerando ainda

mais corrosão nas armaduras, uma vez que está sem a proteção do concreto. Foram localizados 3 pontos de corrosão e lascamento no pavimento inferior e apenas 1 ponto pavimento superior (térreo), sendo esse último de menor proporção, conforme pode ser observado nas Figuras 40, 41, 42 e 43.

Figura 40 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento inferior.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 41 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento inferior.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 42 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento inferior.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 43 - Corrosão nas armadura e destacamento da laje do pavimento superior (térreo).



Fonte: Elaborada pela autora.

4.4. Resultados: Diagnóstico das possíveis causas

As patologias apresentadas nos elementos vigas, pilares e lajes do imóvel basicamente se mostram muito semelhantes, com o lascamento e destacamento do revestimento do concreto, provavelmente originários de fissuras e trincas devido ao produto da expansão das armaduras em estado de corrosão mais avançada.

Essas patologias provavelmente foram geradas por fatores externos associados a ações ambientais como: variações térmicas, radiação solar, chuva, vento, umidade, contaminação do ar, entre outros. Essas ações ambientais sobre a estrutura de concreto estão diretamente relacionadas com o ambiente onde a mesma está inserida. Nesse caso, a edificação em questão está localizada a aproximadamente 2,1 km da costa do mar aberto, conforme já mencionado. Ainda, o clima da cidade de Salvador é tropical caracterizado por elevadas temperaturas, porém constantes, com média climatológica que varia entre 20°C e 30°C. Outro ponto a ser observado está associado a alta salinidade, ou seja, elevada concentração de cloretos na atmosfera, devido à proximidade ao mar, e, ainda a elevada umidade relativa que varia entre 79% a 83%, configurando um ambiente com agressividade forte (classe III) e grande risco de deterioração para estruturas de concreto armado.

A proximidade com o mar significa inferir que os íons cloretos provavelmente têm grande influência na deterioração das estruturas da edificação, aliado ao fato de ser uma zona de bastante umidade dado o clima da região, juntamente com a localização em meio a mata fechada, gera, portanto, o ambiente com as condições ideais para o ataque por cloretos.

A ocorrência de manifestações patológicas, como já dito, raramente é associado a uma só causa, principalmente em estados mais avançados em que várias causas e mecanismos se aliam para gerar os danos, de forma que a separação entre causa e efeito frequentemente torna-se praticamente impossível. Dessa forma, sabe-se que com frequência o início da deterioração inicia-se com um processo químico, e diante das circunstâncias observadas no estudo de caso pode-se inferir que a penetração por cloretos nos poros das estruturas de concreto, notadamente das áreas externas, foi facilitada pelo processo da carbonatação em curso, justamente por ser também um ambiente urbano com quantidades relevantes de CO₂ presentes na

atmosfera, o que gera a redução do pH do concreto e permite que agentes agressivos como os cloretos penetrem com mais facilidade.

Também é provável que a frente de carbonatação e os íons cloreto tenha atingido rapidamente as armaduras visto a baixa espessura da camada de cobrimento de concreto, tendo em vista a região da edificação. Porém, como é uma construção da década de 70, as exigências e recomendações existentes nos textos das principais normas de projeto e execução de estruturas de concreto eram insuficientes e não levavam em conta a agressividade do ambiente para determinação dos cobrimentos, considerando apenas os aspectos de resistência mecânicas das estruturas.

Devido ao conhecimento de que as normas da década de 70 não levavam em consideração as questões de durabilidade das estruturas pode-se inferir que a origem dos problemas encontrados pode ser de projeto.

Ademais, a edificação também é bastante antiga, com 47 anos de existência, e apenas uma reforma de grande escala foi efetuada no imóvel há 37 anos atrás. Isso significa que o tempo sem grandes intervenções é um dos fatores determinantes no grau de deterioração encontrado. Diante do grau de deterioração do imóvel e das informações de intervenções progressas, além de que as patologias encontradas começaram a se manifestar a cerca de 10 anos atrás, é possível inferir que a origem das patologias ainda é pela falta de manutenção aliada ao de projeto.

Não foi possível obter informações sobre a qualidade do concreto, e, portanto, no que diz respeito a porosidade e permeabilidade. Não foram obtidos dados de projetos como traço ou a composição do concreto, visto que a resistência do concreto aos diferentes meios agressivos depende da natureza e tipo dos seus materiais constituintes, assim como da composição ou dosagem do concreto.

Em resumo, pode-se deduzir que a origem dos problemas patológicos nas estruturas do edifício é de projeto e de manutenção e que as causas prováveis sejam a ocorrência dos mecanismos de carbonatação e de ataque por cloretos, o que culminou em corrosão em pontos mais vulneráveis das estruturas.

4.5. Recomendações

A partir da análise das estruturas e como não foi possível a realização de ensaios de qualquer natureza, é recomendável que algumas avaliações e

levantamentos sejam realizados por meio de ensaios. A princípio recomenda-se realizar ensaios destrutivos e não destrutivos para:

- Avaliação da resistência e integridade do concreto;
- Avaliação do processo de corrosão das armaduras;
- Avaliação da segurança estrutural;
- Avaliação de fatores intervenientes na durabilidade;
- Avaliação do estado das armaduras;
- Levantamento da profundidade de carbonatação;
- Levantamento do teor e do perfil de penetração de íons cloreto.

Em função do grande comprometimento dessas estruturas recomenda-se ainda o escoramento da estrutura, afim de garantir a estabilidade do todo da edificação.

É evidente no caso analisado a necessidade de intervenção quanto a um reforço estrutural e também de possíveis reparos localizados. Portanto, como recomendação máxima será indicada a contratação de uma empresa especializada em recuperação e reforço estrutural para que seja realizado um diagnóstico mais preciso acerca da origens e causas das manifestações patológicas, a fim de definir quais medidas deverão ser tomadas para recuperar as estruturas, e em quais locais serão necessários reforços estruturais ou reparos.

Durante a execução dos reparos e reforço recomenda-se ainda atentar para as medidas preventivas já citadas no decorrer desse trabalho, mais notadamente nos itens de carbonatação e ataque por cloretos.

4.6. Conclusão do estudo de caso

Inferiu-se que as estruturas foram atingidas pelo ataque de cloretos agravado também pelo mecanismo da carbonatação. Como este estudo foi feito apenas levado em consideração a inspeção visual recomenda-se a execução de ensaios *in loco* e de laboratório para a confirmação e comprovação dos mecanismos responsáveis pelas manifestações patológicas, além da contratação de empresa especializada para recuperação das estruturas afetadas.

Notoriamente vê-se a necessidade de uma intervenção no pavimento inferior do imóvel, principalmente nas vigas e pilares em que foram verificadas diminuição significativa das seções de armadura, além da perda de seção de concreto. Caso as manifestações patológicas não sejam tratadas e as estruturas recuperadas há possibilidade de comprometimento estrutural da edificação como um todo, uma vez que as capacidades de carga tanto das vigas como dos pilares estão afetadas pela perda de seção transversal das armaduras, perda da aderência aço-concreto e pelo próprio destacamento e lascamento do cobrimento do concreto, podendo, inclusive, comprometer a segurança das pessoas.

5 CONCLUSÃO

A partir da análise e estudos dos mecanismos de deterioração de causa química conclui-se que as manifestações patológicas têm seu desenvolvimento principalmente a partir de agentes agressivos provenientes do meio externo, sendo os agentes agressivos tais como dióxido de carbono, cloretos, sulfatos e ácidos os principais agentes externos a atingir os concretos e causar alteração química.

Esses mecanismos se manifestam das diversas formas entre as quais destaca-se a redução de alcalinidade concreto, a expansão e fissuração do concreto, a desintegração da pasta de cimento, que com o decorrer do processo de deterioração deixam vulneráveis as armaduras trazendo como consequência maior a corrosão.

Os principais fatores intervenientes para o desencadeamento dos mecanismos de causa química do concreto são os fatores ambientais, com destaque para a umidade, sendo necessária tomar medidas para tornar o concreto menos permeável e menos poroso de forma a dificultar a entrada da água no interior do concreto. Outros fatores intervenientes destacam-se também como a concentração dos agentes agressores e a temperatura do meio externo.

Apesar da maioria das alterações químicas no concreto se processarem pela ação de agentes externo, todavia alguns casos podem ser provenientes de reações entre componentes internos do concreto, como é o caso da reação álcali-agregado. Portanto, é importante fazer a seleção adequada dos componentes do concreto na fase de execução, por meio de ensaios laboratoriais, e rejeitar os componentes com quantidade de agentes agressivos acima dos preconizados nas normas.

Assim, algumas considerações e medidas preventivas são essenciais a fim de que evitar e/ou postergar o desenvolvimento de manifestações patológicas por alteração químicas no concreto, dos quais pode-se destacar: especificar baixa relação água cimento; especificar o tipo de cimento adequado em função dos possíveis agentes agressivos no meio ambiente externo ou adições adequadas; especificar maiores cobrimentos também em função da agressividade do ambiente; proceder adequada cura e adensamento do concreto; especificar consumo elevado de cimento; proceder com o controle e tratamento de fissuras existentes nas estruturas; além do controle de acesso de água ao concreto endurecido. Ainda medidas protetivas da superfície do concreto são boas medidas preventivas tais como:

aplicação de tintas, vernizes, aplicação de silicones hidrofugantes, assim como camadas de argamassa e revestimentos cerâmicos.

A partir da análise das medidas preventivas constata-se que é possível aumentar a durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, evitando ou postergando o aparecimento de manifestações patológicas originárias de causas químicas, a partir de medidas tomadas na etapa de projeto e execução.

Em suma, a produção de concretos com maior qualidade, com diminuição da porosidade e permeabilidade, já dificulta substancialmente a penetração dos agentes agressivos nos poros do concreto e assim evita-se o ataque da corrosão das armaduras, que se configura como um dos sintomas mais sérios das manifestações patológicas.

Por meio do estudo de caso, percebe-se que além das medidas a serem tomadas no projeto e execução é de fundamental importância a execução de manutenção, visto que a sua não realização vem a diminuir a vida útil e durabilidade das estruturas, podendo inclusive a comprometer a segurança estrutural, além de trazer custo elevados para recuperação.

Conclui-se, portanto, que é essencial o conhecimento sobre as origens, causas, mecanismos, fatores intervenientes e sintomas da degradação química do concreto, bem como das medidas preventivas, a fim de se produzir estruturas mais duráveis e com maior vida útil, postergando o aparecimento e o desenvolvimento das manifestações patológicas, que de qualquer forma atingirá as estruturas de concreto pelo envelhecimento natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, José Eduardo de. **Avaliação dos Ensaios de Durabilidade do Concreto Armado a partir de Estruturas Duráveis**. 173 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

AL-KHAJA, Waheeb A. Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. **Construction and Building Materials**, v. 11, n. 1, p. 9-13, 1997.

ANDRADE, Tibério. Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. cap.25. p.753-792.

ANDRADE, Tibério; SILVA, Angelo Just da Costa e. Patologia das Estruturas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. cap.32. p.953-982.

ARAÚJO, Fernanda Wanderley Corrêa de. **Estudo da Repassivação das Armaduras em Concretos Carbonatados através da Técnica de Realcalinização Química**. 217p. Tese (Doutorado em Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

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

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12655**: Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15577**: Agregados – Reatividade álcali-agregado- Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15900**: Água para amassamento do Concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

BAKKER, R. F. M. **Initiation Period: Corrosion of steel in concret; State of the Art Report. Cap. 3, RILEM TC60-CSC**, Editor Peter Schiessl, Ed. Chapman & Hall, 1988, p. 22-54.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**: aspectos relativos ao projeto. 149 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

BRE. The durability of steel in concrete: part 1; mechanism of protection and corrosion. Garston, **Building Research Establishment Digest**, Digest 263, Jul. 1982, 7 p.

CASCUDO, Oswaldo. **Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto**. São Paulo: Pini, 1997.

CASCUDO, Oswaldo. Inspecção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com problemas de Corrosão da Armadura. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 35, p. 1071-1106.

CEB. Durability of concrete structures. Report of CEB-RILEM Internacional Workshop. Copenhagen, Mai, 1993; **CEB Bolletin D'Information**, n. 152, 1984.

_____. Durability of concrete structures. State of Art Report. **Bolletin D'Information n. 148**, Paris, 1982.

COUTO, Tiago Andrade. **Reação Álcali-Agregado: Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas**. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

FERREIRA, Rui Miguel. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão**. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção de armadura contra corrosão através de técnicas eletroquímicas: Contribuição ao estudo do reparo de estruturas de concreto armado**. 423p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

_____. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, cap. 27, p. 828- 855.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos aplicados**. São Paulo: PINI, 2008.

GAIER, Claudia Veppo. **Análise do desempenho de materiais de reparo industrializados para estruturas de concreto frente ao ataque ácido**. 153 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado Profissional em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GASTALDINI, Antônio Luiz Guerra; ISAIA, Geraldo Cechella; ZANELLA, Renato. Influência da finura da escória na carbonatação de concretos com adições minerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 5., 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCP, 1999.

GJORV, O. E.; VENNESLAND, O. **Diffusion of chlorides ions from seawater into concrete**. Cement and Concrete Research. v. 91. 1979. p. 229-238.

GOOGLE. **Google Earth Web**. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 248 f. Tese (Livre Docência em Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto. In: Workshop Durabilidade das Construções, 1997, São Leopoldo. **Anais...** São Leopoldo: Antac, 1997. P. 31-42.

_____. Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB 1/2001. In: Workshop sobre Durabilidade das Construções, 2., 2001, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2001.

_____. Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto armado. In: **Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto**. São Paulo, Brasil, 2007. Introducción, p 17-32.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3ED. São Paulo: IBRACON, 2010. cap. 29. p. 905-944.

HAUSMANN, D. A. Steel Corrosion in Concrete: How Does it Occur? **Materials Protection 6**, p. 16-28, 1967.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). General Principles on the Design of Structures for Durability. **ISO 13823**. Geneva: ISO/TC, 2008.

ISAIA, Geraldo Cechella. Durabilidade do Concreto ou das Estruturas de Concreto? Reflexões sobre o Tema. In: Workshop sobre Durabilidade das Construções, 2., 2001, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 2002.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para análise de eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra carbonatação**. 168 p. Tese (Doutorado), CPGECC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

KOPSCH, Wilson. **Durabilidade de estruturas de concreto armado em ambiente marinho**: Estudo de Caso. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

LORENZINI, Rodrigo Vitali. **Avaliação Probabilística da Deterioração de Estruturas em Concreto Armado**. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de

Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MANGAT, P. S.; MOLLOY, B. T. Factores, influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concreto. **Materials and Structures**, v.25, 1992, p. 404-411.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011, v.1, p. 773-808

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

MEIRA, G. M. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 327 p. Tese (Doutorado), Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MITIDIERI FILHO, C.V.; Qualidade e Desempenho na Construção Civil. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON, 2007. v. 1. p. 37 – 74.

NEPOMUCENO, Antonio Alberto. Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. cap.26. p.793-827.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 1982. 738 p.

_____. _____. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PAGE, C. L.; SHORT, N. R.; HOLDEN, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. **Cement and Concrete Research**, v. 16, 1986, p. 79-86.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**. São Paulo, v.53, p.14-19, jan./fev./mar. 2009.

POGGIALI, Flávia Spitale Jacques. **Durabilidade de Estruturas de Concreto em Usinas Siderúrgicas**. 81 p. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. **Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações**: abordagem geral. REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA DO CREA-PR, v. V1, p. 1-18, 2013.

PRISZKULNIK, Simão. Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-agregado. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v. cap.34. p.1017-1066.

RASHEEDUZZAFAR et al. Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 5, n. 5, p. 723-738, September, 1990.

REIS, Lilia Silveira Nogueira. **Sobre a Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado**. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

RIBEIRO, Daniel Vêras (Coord.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ROQUE, James Antônio; MORENO JUNIOR, Armando Lopes. Considerações sobre vida útil do concreto. In: Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, 1., 2005, São Carlos... **Anais...** São Carlos, 2005.

SARJA, A.; VESIKARI, E.; (Editors) (1996), **Durability design of concrete structures**, RILEM Report 14, E&FN Spon, CRC Press, Ottawa, 165 p.

SILVA, Djalma Ribeiro. **Estudo de inibidores de corrosão de concreto armado, visando a durabilidade**. 195 p. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Centro de Ciências exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA, Patrícia Neves. **Reações Álcali-Agregado nas Usinas Hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/ CHESF: Influência da reação nas propriedades do concreto**. 241p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVA, Paulo Fernando A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1995. 152 p.

SILVA, Pedro Neto Roberto. **Ataque em estruturas de concreto por ação de cloretos**, 12 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.axfiber.com.br/single-post/2017/01/12/Ataque-em-estruturas-de-concreto-por-a%C3%A7%C3%A3o-de-cloretos>>. Acesso em: 17 out. 2017.

SILVA, Turíbio José da. **Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro**. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d'enginyers de Camins, Universidade Politécnica da Catalunya, Barcelona, 1998.

SOUZA, Rui Barbosa. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos - Método de ensaio acelerado**. 139 p. Dissertação (Mestrado em

Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, Rui Barbosa de et al. Influência das Variáveis Atmosféricas na Degradação dos Materiais da Construção Civil. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, 2016.

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

SMOLCZY, H. G. **Discussion of principal paper on carbonation of concreto by Hamada**. In: 5ª Internacional Conference on Chemistry of Cement, Tokyo, v.3. 1968. Proceedings. Tokyo, 1969. P. 369-384.

VIEIRA, Fernanda Macedo Pereira. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VILASBOAS, José Márcilio Ladeia. **Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador**: uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003. 229p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

XAVIER, João Paulo Matos. **Influência de projetos e detalhes arquitetônicos em patologias de estruturas**: estudo de caso. 155 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.