



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE – CCTS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ADVANALDO DE SOUZA SOARES

**IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DAS PONTES DE
CONCRETO ARMADO NA REGIÃO DO CURIMATAÚ ORIENTAL PARAIBANO:
ESTUDO DE CASO**

**ARARUNA
JUNHO / 2015**

ADVANALDO DE SOUZA SOARES

**IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DAS PONTES DE
CONCRETO ARMADO NA REGIÃO DO CURIMATAÚ ORIENTAL PARAIBANO:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Msc. Maria das Vitórias do Nascimento.

**ARARUNA
JUNHO / 2015**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S676i Soares, Advanaldo de Souza
Identificação dos mecanismos de deterioração das pontes de concreto armado na região do curimataú oriental paraibano [manuscrito] : estudo de caso / Advanaldo de Souza Soares. - 2015.
60 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Tecnologia e Saúde, 2015.
"Orientação: Ma. Maria das Vitórias do Nascimento, Departamento de Engenharia Civil".

1. Pontes. 2. Patologias das construções. 3. Concreto armado
I. Título.

21. ed. CDD 624.2

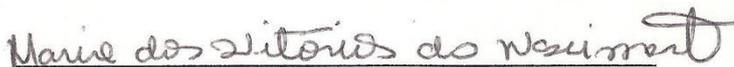
ADVANALDO DE SOUZA SOARES

IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO DAS PONTES DE
CONCRETO ARMADO NA REGIÃO DO CURIMATAÚ ORIENTAL PARAIBANO:
ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso em
Engenharia Civil da Universidade Estadual da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil.

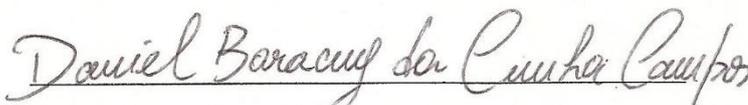
Aprovada em: 03/06/2015

BANCA EXAMINADORA



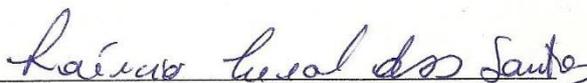
Prof. Msc. Maria das Vitórias do Nascimento (Orientador)

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Msc. Daniel Baracuy da Cunha Campos

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dsc. Laércio Leal dos Santos

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Aos meus pais Severino e Alice, pela dedicação,
companheirismo e amizade, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A minha mãe Alice de Souza Soares, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Ao meu pai Severino Soares da Silva, que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e que para mim foi muito importante.

Ao meu irmão Joalison de Souza Soares, a minha avó, tias, tios e primos pela compreensão por minha ausência nas reuniões familiares.

À esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

A minha orientadora Maria das Vitórias do Nascimento, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube pelas suas correções e incentivos.

Meus agradecimentos aos amigos Raul Mauricio, Rafael Barboza, Matheus Mariz, Túlio Raunyr, José Valter, Joaldo Batista, Denise Bernardino, Herivelton Ruan e a todos que, mesmo não estando citados aqui, fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“O sonho é que leva a gente para a frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

Nos últimos anos, a durabilidade das edificações tem sido um dos temas mais estudados pelos pesquisadores na área de construção e estruturas. Embora, o concreto apresente uma vida longa na maioria dos ambientes, quando não devidamente dosado e executado, torna-se facilmente vulnerável à ação das intempéries. O objetivo desse trabalho foi a realização de um levantamento sistemático das manifestações patológicas do concreto e um estudo de caso sobre os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado de três pontes na rodovia PB-073, localizadas na região do Curimataú Oriental Paraibano, entre os Municípios de Belém (PB) e Tacima (PB), bem como apontar sugestões de reabilitação. A metodologia consistiu em realizar estudos sobre as causas da redução da durabilidade do concreto e buscar identificar “*in loco*” as manifestações patológicas em três obras de artes especiais, descrevendo-se o estado de conservação e identificando-se os possíveis agentes de deterioração em cada caso, juntamente com as respectivas sugestões de tratamento de recuperação da peça afetada. O estudo de caso foi desenvolvido teoricamente e seguido de inspeções visuais com ampla documentação fotográfica, o que significa que não foram realizados quaisquer experimentos para a verificação da integridade da estrutura, tais como os ensaios destrutivos e os não destrutivos. Portanto, conclui-se que as três pontes de concreto armado inspecionadas apresentam falta de conservação e diversas manifestações patológicas, oferecendo riscos à segurança da sociedade e evidenciando a ineficiência nos setores de projeto e manutenção dos órgãos públicos responsáveis por tais estruturas.

Palavras-Chave: Manifestações patológicas, Mecanismos de deterioração, Concreto armado.

ABSTRACT

In recent years, the durability of buildings has been one of the subjects most widely studied by researchers in the field of construction and structure. Although the concrete present a long life in most environments when not properly dosed and executed, it becomes easily vulnerable to inclement weather. The aim of this study was to conduct a systematic survey of the pathological manifestations of concrete and a case study on the deterioration mechanisms of reinforced concrete structures of three bridges in the PB-073 highway, located in the Eastern Curimataú Paraíba region, between municipalities of Bethlehem (PB) and Tacima (PB) and point rehabilitation suggestions. The methodology was to conduct studies on the causes of the reduction of concrete durability and seek to identify "in loco" the pathological manifestations in three special works of arts, describing the state of conservation and identifying possible deterioration of agents in each case, together with their recovery treatment suggestions of the affected part. The case study was developed theoretically and followed by visual inspection with ample photographic documentation, which means that any experiments were not conducted to verify the integrity of the structure, such as the destructive testing and non-destructive. Therefore, it is concluded that the three bridges of reinforced concrete inspected present lack of conservation and various pathological manifestations, posing risks to the security of society and highlighting the inefficiency in the design and maintenance of public sector agencies responsible for such structures.

Keywords: Pathological Manifestations. Deterioration mechanisms. Reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Guarda-corpos danificado por choques de veículos automotores em ponte da PB-073.	23
Figura 2 – Fissuras em pilares ou encontros provocados por recalques diferenciais.	24
Figura 3 – Processo de perda de material por abrasão em superfície de concreto.	25
Figura 4 – Evolução do desgaste superficial do concreto por erosão, devido ao movimento do líquido e/ou atrito de partículas suspensas neste.	25
Figura 5 – Abrasão em pilar de ponte.	26
Figura 6 – Efeito da implosão das bolhas da cavitação em bacia de dissipação	26
Figura 7 – Descamação do concreto ocasionado pela cristalização de sais nos poros.	27
Figura 8 – Fissuração típica de retração em muro.	28
Figura 9 – Fissuração típica de retração térmica.	29
Figura 10 – Fissuração típica de dilatação térmica.	30
Figura 11 – Fissuração devido a variação volumétrica causada pela variação térmica	30
Figura 12 – Edifício na Espanha com sua estrutura de concreto armado degradada pela ação do fogo	31
Figura 13 – Desenvolvimento da reação álcalis-agregado no concreto	33
Figura 14 – Reação álcali-agregado em bloco de fundação	34
Figura 15 – Degradação do pilar por ação de sulfatos	34
Figura 16 – Pilar com armadura exposta.	35
Figura 17 – Lixiviação da pasta de cimento.	36
Figura 18 – Esquematização do fenômeno de carbonatação.	37
Figura 19 – Avanço da carbonatação na estrutura de concreto armado	38
Figura 20 – Avanço da carbonatação, indicada por teste à base de fenolftaleína.	38
Figura 21 – Penetração de cloretos em concreto submetido à umidade e início à corrosão.	39
Figura 22 – Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura.	40
Figura 23 – Os três tipos de corrosão segundo a morfologia.	42
Figura 24 – Pilha eletroquímica por corrosão galvânica em concreto armado.	42
Figura 25 – Perda de seção na barra de aço devido à corrosão eletroquímica.	42
Figura 26 – Fases da instalação da corrosão em uma armadura.	43
Figura 27 – Progresso das fissuras em um processo corrosivo.	43
Figura 28 – Vista Geral da Ponte.	45
Figura 29 – Vista do Tráfego.	45

Figura 30 – Vista Inferior da Ponte 01.	45
Figura 31 – Deterioração dos guarda-corpos e estrutura danificada.	45
Figura 32 – Deterioração do passeio com armadura exposta	46
Figura 33 – Interrupção da funcionalidade das juntas de dilatação.	46
Figura 34 – (A) Descamação do concreto, (B) Arqueamento da estrutura e (C) Eflorescência.	46
Figura 35 – Obstrução do sistema de drenagem.	46
Figura 36 – Vista do Tráfego.	49
Figura 37 – Vista Geral da Ponte.	49
Figura 38 – Vista Inferior da Ponte.	49
Figura 39 – Deterioração do Guarda-corpo.	49
Figura 40 – Destacamento do concreto de cobertura.	50
Figura 41 – Ataque por carbonatação produzindo sais de cálcio	50
Figura 42 – Fissuração no muro de gravidade.	50
Figura 43 - Ausência de pingadeira da laje em balanço.	50
Figura 44 – Falhas na pavimentação.	50
Figura 45 – Vista do Tráfego.	53
Figura 46 – Vista Geral da Ponte.	53
Figura 47 – Fissura de tração nos encontros.	53
Figura 48 – Desagregação da massa de concreto.	53
Figura 49 – (a) Ausência de pingadeira na face inferior da laje e (b) Armadura aparente.	53
Figura 50 – Armadura exposta e perda de seção de viga primária.	54
Figura 51 – Destacamento do concreto de cobertura e exposição das armaduras.	54
Figura 52 – Oxidação da armadura com perda de cobertura e trechos desagregados.	54
Figura 53 – Deterioração do pavimento.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Causas, Mecanismos e Sintomas das Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado.	21
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dimensões e Localização da Ponte 01.	44
Quadro 2 – Componentes, Mecanismos, Sintomas e Sugestões para a Reabilitação da estrutura afetada.	47
Quadro 3 – Dimensões e Localização da Ponte 02.	48
Quadro 4 – Componentes, Mecanismos, Sintomas e Sugestões para a Reabilitação da estrutura afetada.	51
Quadro 5 – Dimensões e Localização da Ponte 03.	52
Quadro 6 – Componentes, Mecanismos, Sintomas e Sugestões para a Reabilitação da estrutura afetada.	55

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água-cimento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
RAA	Reação Álcali-Agregado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO GERAL	16
2.1.	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1.	Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado	17
3.2.	Manifestações Patológicas das Construções	18
3.3.	Deterioração das Estruturas de Concreto Armado	18
3.4.	Causas, Mecanismos e Sintomas das Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado	19
3.4.1.	<i>Falhas Humanas Durante a Construção da Estrutura</i>	22
3.4.2.	<i>Causas Mecânicas</i>	23
3.4.3.	<i>Causas Físicas</i>	24
3.4.3.1.	<i>Desgaste Superficial do Concreto por Abrasão, Erosão e Cavitação</i>	24
3.4.3.2.	<i>Cristalização de Sais nos Poros do Concreto</i>	27
3.4.3.3.	<i>Retração Hidráulica do Concreto no Estado Fresco</i>	28
3.4.3.4.	<i>Efeito dos Gradientes Térmicos nas Estruturas de Concreto</i>	28
3.4.3.5.	<i>Ação do Fogo na Estrutura de Concreto Armado</i>	31
3.4.4.	<i>Causas Químicas</i>	31
3.4.4.1.	<i>Reação Álcali-agregado</i>	32
3.4.4.2.	<i>Ataque por Sulfatos</i>	34
3.4.4.3.	<i>Ataque por Ácidos</i>	35
3.4.4.4.	<i>Ataque por Água Pura</i>	36
3.4.4.5.	<i>Carbonatação</i>	37
3.4.4.6.	<i>Ataque por Cloretos</i>	39
3.4.5.	<i>Causas Eletroquímicas</i>	40
4	ESTUDO DE CASO	44
4.1.	Ponte sobre o Riacho da Picada (Ponte 01)	44
4.2.	Ponte sobre o Rio Dantas (Ponte 02)	48
4.3.	Ponte sobre o Riacho Carnaúba (Ponte 03)	52

5 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é considerado o material estrutural mais importante da atualidade na construção civil. Sua descoberta no final do século XIX e o intensivo uso no século XX, o transformaram no material mais consumido pelo homem depois da água, revolucionando a arte de projetar e construir estruturas (HELENE; ANDRADE, 2010).

Nenhum material possui duração eterna, por isso o envelhecimento das estruturas começou a ser acompanhado por surgimento de problemas. Então, iniciou-se uma ciência que buscava estudar as causas, formas de manifestação, consequência e mecanismos de deterioração das edificações, denominada de Patologia das Estruturas (CUNHA, 2011).

As manifestações patológicas podem ser apresentadas com uma ou mais formas de deterioração do concreto armado, comprometendo o aspecto estético da edificação e também a capacidade resistente podendo levar ao colapso parcial ou total da construção, fato que pode demandar alto custo monetário para a recuperação. O diagnóstico de um fenômeno patológico deve ser embasado em uma análise profunda da estrutura e o conhecimento adequado dos mecanismos de formação e manifestação das patologias.

Para tanto foi realizado um embasamento teórico, seguido de inspeções “*in loco*” a fim de avaliar as manifestações patológicas em três pontes de concreto armado da rodovia PB-073, descrevendo-se o estado de conservação e identificando-se os possíveis agentes de deterioração em cada caso, juntamente com as respectivas sugestões de tratamento de recuperação da peça afetada.

Observa-se que as três obras de artes especiais inspecionadas apresentam falta de conservação e diversas manifestações patológicas, oferecendo riscos à segurança da sociedade e evidenciando a ineficiência nos setores de projeto e manutenção dos órgãos públicos responsáveis por tais estruturas.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desse trabalho é a realização de um levantamento sistemático das manifestações patológicas do concreto e realizar um estudo de caso sobre os mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado de três pontes na rodovia PB-073, localizadas na região do Curimataú Oriental Paraibano, entre os Municípios de Belém (PB) e Tacima (PB), bem como apontar sugestões de reabilitação.

2.1. Objetivos Específicos

- Revisão sobre os mecanismos de deterioração do concreto;
- Descrever o estado de conservação das três pontes analisadas;
- Identificar os possíveis agentes de deterioração das três pontes de concreto armado;
- Apontar as respectivas sugestões para reabilitação das estruturas afetadas, quando for o caso;
- Alertar aos órgãos públicos responsáveis por tais estruturas sobre o nível de deterioração estrutural.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), durabilidade é a capacidade das estruturas resistirem às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. 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 período correspondente à sua vida útil.

Gaspar (1988), define durabilidade como a capacidade de manter uma estrutura em serviço e com segurança, durante um tempo especificado ou período de vida útil em um determinado meio ou entorno, mesmo que este meio seja desfavorável ao concreto. Nota-se, nesta última definição de durabilidade, a expressão “vida útil”. Trata-se de outro importante conceito, intimamente relacionado ao de durabilidade. De acordo com Monteiro (2002) a vida útil é definida como o período no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) – “por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantém as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais”.

A dificuldade de especificar e quantificar a vida útil, isto é, de se introduzir o fator “tempo” na abordagem da durabilidade das estruturas de concreto é função da complexidade dos mecanismos de deterioração envolvidos (ANDRADE, 2005).

As estruturas e seus materiais deterioram-se mesmo quando existe um programa de manutenção bem definido, sendo esta deterioração, no limite, irreversível. Algumas delas, por falhas de projeto ou de execução, já iniciam as suas vidas úteis de forma insatisfatória, enquanto outras chegam ao final de suas vidas úteis ainda mostrando um bom desempenho. O fato de uma estrutura, em determinado momento, apresenta-se com desempenho insatisfatório não significa que esteja necessariamente condenada. A avaliação desta situação é, talvez, o objetivo maior da Patologia das Estruturas, posto que esta seja a ocasião que requer imediata intervenção técnica, de forma que ainda seja possível reabilitar a estrutura (SANTOS, 2012).

3.2. Manifestações Patológicas das Construções

Para Souza e Ripper (1998), designa-se por Patologia das Estruturas o campo da engenharia civil que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestação, consequências e mecanismos de ocorrências das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas.

Patologia é definida como a perda ou queda de desempenho de um produto ou componente da estrutura, sendo o mesmo extraído da área da saúde e identifica o estudo das doenças, seus sintomas e natureza das modificações que elas provocam no organismo (ANDRADE; SILVA, 2005).

Segundo Cunha (2011), nenhum material possui duração eterna, por isso, o envelhecimento das estruturas começou a ser acompanhado por surgimento de problemas. Assim, iniciou-se uma ciência que buscava estudar as causas para a ocorrência dos problemas e as ações preventivas e terapêuticas, denominada de Patologia das Construções.

Andrade e Silva (2005), definem alguns conceitos fundamentais usados para expressar as patologias encontradas, sendo estas como:

- **Anomalia ou sintoma** – É a indicação sintomática da ocorrência de um defeito;
- **Defeito** – Não conformidade de qualquer característica do material, em desacordo com sua especificação, indicando um desvio do seu comportamento previsto, que pode não necessariamente resultar numa falha;
- **Falha** – Qualquer tipo de irregularidade que possa impedir o normal funcionamento da estrutura;
- **Reparo** – É a ação que busca devolver a um elemento ou estrutura a condição de estabilidade prevista no projeto original, reduzida ao longo da sua utilização;
- **Causa da deterioração** – refere-se à natureza da degradação, podendo ser mecânica, física, química, eletroquímica e biológica;
- **Origem da deterioração** – Está relacionada com as fases ou etapas do ciclo de vida da estrutura em que surgiu a patologia (fase de projeto, execução e vida útil).

3.3. Deterioração das Estruturas de Concreto Armado

O concreto é um material poroso, cujos vazios presentes são originados de diversas formas, tais como o excesso de água de mistura (necessária à obtenção da trabalhabilidade conveniente), diminuição de volume que acompanha a hidratação do cimento, ar incorporado

durante a operação de mistura, erro na dosagem dos insumos, etc. Como esses vazios são geralmente interligados, o concreto é normalmente permeável aos líquidos e gases (BAUER, 2011).

Sartorti (2008) afirma que o excesso de água é um fator importante para a manifestação de patologias em estruturas de concreto. Seu uso exagerado causa a criação de vazios e uma rede de poros em seu interior, facilitando o transporte de substâncias nocivas do meio ambiente para o interior da peça, acelerando os processos de carbonatação e corrosão das armaduras.

Para Nepomuceno (2005), a degradação das estruturas de concreto se dá pela penetração de substâncias na forma de gases, vapores e líquidos, através dos poros e fissuras. A umidade relativa, frequência das chuvas, orientação dos ventos, temperatura e concentrações de substâncias agressivas presentes no meio, etc. Além do que as características dos materiais constituintes do concreto e de seus poros, são fatores importantes na interação entre o meio ambiente e o concreto.

Quanto mais permeável um concreto for ao transporte interno de água, gases e outros agentes agressivos, maior será a probabilidade de sua degradação, bem como a do aço que deveria proteger. Nestes casos a degradação dependerá, diretamente, de dois fatores: permeabilidade do concreto e condições ambientais da superfície. Como, em geral, não se pode lidar com a melhoria das condições ambientais, a única saída, nesse sentido, para se evitar a degradação dos concretos é a redução, ao menor nível possível da sua permeabilidade, através de uma dosagem adequada (SOUZA; RIPPER, 1998).

3.4. Causas, Mecanismos e Sintomas das Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado

É indispensável o conhecimento das causas da deterioração do concreto, não apenas para que se possa proceder aos reparos exigidos, mas também para garantir que depois de reparada, a estrutura não volte a se deteriorar (SOUZA; RIPPER, 1998).

Segundo Andrade (2005), existem quatro principais causas responsáveis pela redução da durabilidade do concreto armado, as quais podem ser classificadas, de acordo com sua natureza, em:

- Mecânicas;
- Físicas;
- Químicas;

- Eletroquímica.

Qualquer causa da deterioração existe um ou mais agentes atuantes que, por meio de mecanismos de degradação, interagem com o concreto e o aço, reduzindo gradativamente, o seu desempenho (ANDRADE, 2005).

Na Tabela 1 apresenta-se, de forma resumida, as quatro principais causas de degradação do concreto armado, os mecanismos de deterioração, os respectivos sintomas e os locais diretamente afetados.

Tabela 1 – Causas, Mecanismos e Sintomas das Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado.

CAUSAS DA DETERIORAÇÃO	MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	SINTOMAS	AFETA DIRETAMENTE
MECÂNICA	Choques e Impactos	Fissuração e lascamento do concreto, possível perda de armadura	Peça estrutural (concreto + armadura)
	Recalques Diferenciais Das Fundações		
FÍSICA	Acidentes Imprevisíveis	Desgaste Superficial do Concreto	Concreto
	Desgaste Superficial		
	Abrasão, Erosão e Cavitação	Fissuração e escamamento do Concreto	Concreto
	Cristalização de Sais nos Poros do Concreto	Fissuração do Concreto	Concreto
	Retração Hidráulica do Concreto Fresco		
	Assentamento Plástico	Fissuração do Concreto	Concreto
	Retração Plástica		
Gradiente Térmico	Retração Térmica / Dilatação Térmica	Fissuração do Concreto	Concreto
Ação do Fogo (Incêndio)		Fissuração; Desidratação da pasta de cimento; expansão dos agregados; desagregação do concreto; ruptura e colapso da armadura	Peça estrutural (concreto + armadura)
QUÍMICA	Reação Álcali-Agregado	Expansão e Fissuração do Concreto	Concreto
	Ataque por Sulfatos	Decomposição química da pasta; despassivação do aço; expansão, fissuração, desintegração, perda de resistência e de massa do concreto	Concreto
	Ataque por Ácidos	Decomposição química, dissolução e lixiviação; expansão, fissuração e desagregação do concreto	Concreto (o HCl, por sua vez, ataca ambos - concreto e aço)
	Água Pura	Decomposição química, dissolução e lixiviação da pasta de cimento; eflorescência, estalactite e estalagmite	Concreto
	Carbonatação	Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço, abrindo caminho para a corrosão do aço	Inicialmente o concreto, posteriormente o aço
	Ataque por Cloretos	Despassivação do aço, posteriormente, corrosão das armaduras (processo eletroquímico)	Inicialmente o concreto, posteriormente o aço
	ELETROQUÍMICA	Corrosão das Armaduras	Deterioração e perda de seção do aço; perda da aderência aço-concreto; expansão, fissuração e lascamento do concreto

Fonte: adaptado de ANDRADE (2005).

3.4.1. Falhas Humanas Durante a Construção da Estrutura

Segundo Souza e Ripper (1998), os defeitos construtivos são falhas comuns, originando-se, na grande maioria dos casos, na deficiência de qualificação profissional da equipe técnica, o que pode ocasionar manifestações patológicas significativas. Os autores citam essas falhas:

- **Deficiência de Concretagem** – Provocadas no transporte, no lançamento e no adensamento do concreto, que podem provocar, por exemplo, a segregação entre o agregado graúdo e a argamassa, além da formação de ninhos de concretagem e de cavidades no concreto;
- **Inadequação de Fôrmas e Escoramentos** – Provocadas por falta de limpeza e de aplicação de desmoldantes nas fôrmas antes da concretagem; insuficiência de estanqueidade das fôrmas, o que torna o concreto mais poroso, por causa da fuga da nata de cimento através das juntas e fendas próprias da madeira; retirada prematura das formas e escoramentos e remoção incorreta dos escoramentos, o que provoca o surgimento de trincas nas peças;
- **Deficiência nas Armaduras** – Podem ser apontadas como as mais frequentes que são: má interpretação dos elementos de projeto, que implica na inversão do posicionamento de algumas armaduras ou na troca das armaduras de uma peça com as de outras; insuficiência de armaduras, com implicação direta na diminuição da capacidade resistente da peça estrutural; mau posicionamento das armaduras, ou no deslocamento das barras de suas posições originais; cobrimento de concreto insuficiente, ou de má qualidade e má utilização de anticorrosivos nas barras da armadura;
- **Utilização Incorreta de Materiais de Construção** – Provocadas pela utilização de concreto com f_{ck} inferior ao especificado, utilização de aço com características diferentes das especificadas, assentamento das fundações em camadas de solo com capacidade resistente inferior à requerida, utilização de agregados reativos e dosagem inadequada de concreto;
- **Inexistência de Controle de Qualidade** – Sendo a maior de todas as causas relacionadas com falhas humanas na construção, com um controle de qualidade adequado, as causas relacionadas nos pontos (a) a (d), na sua grande maioria, seriam substancialmente reduzidas as suas ocorrências.

3.4.2. Causas Mecânicas

Souza e Ripper (1998), designa-se as causas referentes às solicitações mecânicas as quais as estruturas de concreto estão sujeitas, sendo elas:

- Choques e Impactos (por veículos automotores, por exemplo);
- Recalques das Fundações;
- Acidentes (ações imprevisíveis, por exemplo, incêndios, inundações, esforços devido ao vento, etc.).

As causas mecânicas comprometem a capacidade resistente da estrutura, facilitando a entrada de agentes agressivos na estrutura danificada, principalmente quando o concreto e a armadura ficam expostos devido ao impacto das solicitações (ANDRADE, 2005).

Além do choque de veículos automotores contra pilares, guarda-corpos (Figura 1) e guarda-rodas de viadutos que podem ser, desde o desgaste superficial de concreto à destruição de algumas peças estruturais (SOUZA; RIPPER, 1998).



Figura 1 – Guarda-corpos danificado por choques de veículos automotores em ponte da PB-073.

Fonte: Própria.

Souza e Ripper (1998), afirmam que toda construção, durante o processo executivo ou depois do seu término, por um determinado período de tempo, está sujeita a recalques de suas fundações, até atingir o equilíbrio entre solo e o carregamento aplicado. Em projetos com erros de cálculos nas fundações, ocorrem recalques diferenciais entre vários apoios, causando a abertura de trincas nas alvenarias e na estrutura de acordo com a Figura 2.

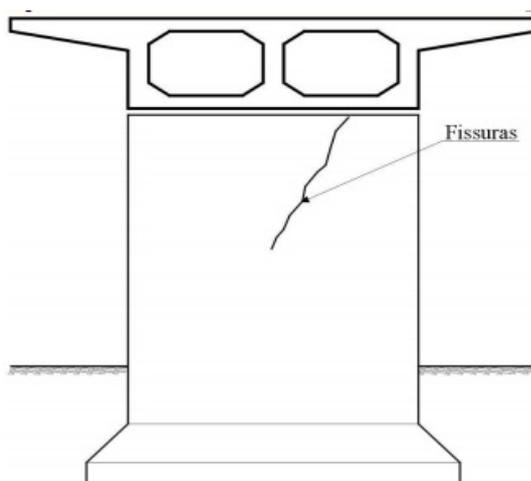


Figura 2 – Fissuras em pilares ou encontros provocados por recalques diferenciais.

Fonte: Própria.

3.4.3. Causas Físicas

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2006), às causas físicas da deterioração do concreto podem ser classificadas em duas categorias, que são:

- Desgaste superficial, ou perda da massa do concreto devido à abrasão, à erosão e à cavitação;
- Fissuração, desidratação da pasta de cimento, expansão dos agregados e desagregação do concreto, devidos a gradientes normais de temperatura e umidade, a carregamento estrutural e à exposição a extremos de temperaturas, tais como congelamento ou fogo.

Para Souza e Ripper (1998), as principais ações físicas agravantes às estruturas de concreto são resultantes da variação extrema da temperatura, da ação do vento, do fogo e da água (sob a forma de chuva, gelo e umidade).

3.4.3.1. Desgaste Superficial do Concreto por Abrasão, Erosão e Cavitação

O desgaste por abrasão de uma superfície de concreto é provocado pelo mecanismo de fricção ou atrito, a seco, que tem como agente qualquer material abrasivo, proveniente do tráfego de pessoas, veículos, ou até mesmo pela ação do vento, provocando perda de material e geração de pó (ANDRADE, 2005).

Para ACI 201.2R (2008), o fenômeno do desgaste superficial por abrasão em concretos ocorre de forma progressiva, sendo que inicialmente a resistência à abrasão do material está

relacionada com a qualidade da camada superficial. Com esse desgaste os agregados miúdos e graúdos são expostos, e com a permanência da sollicitação por abrasão, o processo de desgaste continuará ocorrendo. Nesta etapa mais avançada, a resistência à abrasão passa a depender da dureza dos agregados e a aderência com a pasta de cimento.

Andrade (2005) afirma que, quanto maior a dureza e menor a porosidade da pasta de cimento, maior será a resistência do concreto à abrasão. As estruturas mais suscetíveis ao desgaste por abrasão podem ser: pavimentos rodoviários, pontes, pisos industriais (Figura 3), etc.



Figura 3 – Processo de perda de material por abrasão em superfície de concreto.
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA; TULA, 2006

Santos (2012), afirma que o desgaste superficial por erosão é causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas finas suspensas conforme Figura 4, sendo influenciado pela velocidade da água, quantidade do concreto e às características das partículas transportadas, como: massa específica, quantidade, forma, dureza, etc.).

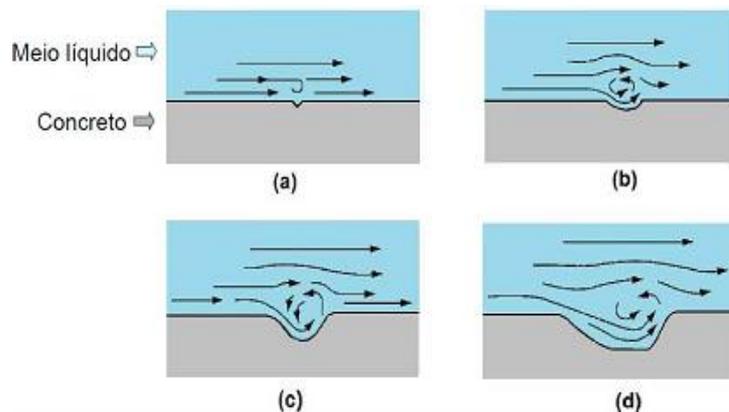


Figura 4 – Evolução do desgaste superficial do concreto por erosão, devido ao movimento do líquido e/ou atrito de partículas suspensas neste. Fonte: SANTOS, 2012.

O fenômeno da abrasão ocorre em tubulões e pilares mergulhados em água e sujeitos a ação das correntezas, que sempre transportam partículas que se chocam contra as superfícies de concreto. A Figura 5 ilustra um pilar de uma ponte que sofreu processo de abrasão (CUNHA, 2011).



Figura 5 – Abrasão em pilar de ponte. Fonte: DNIT (2004)

De acordo com DNIT (2006), em águas correntes, formam-se bolhas de vapor quando a pressão absoluta local, em dado ponto na água, é reduzida à pressão de vapor ambiente da água, para dada temperatura ambiente. Quando as bolhas de vapor que fluem na água entram em uma região de pressão mais elevada, elas implodem com grande impacto, pela entrada de água a alta velocidade nos espaços antes ocupados pelo vapor, causando bruscas erosões localizadas, conforme a Figura 6.



Figura 6 – Efeito da implosão das bolhas da cavitação em bacia de dissipação.
Fonte: SANTOS, 2012.

A superfície do concreto, fica com uma aparência irregular e corroída, muito diferente das superfícies desgastadas de forma regular pela erosão de sólidos em suspensão (DNIT, 2006).

3.4.3.2. *Cristalização de Sais nos Poros do Concreto*

Andrade (2005), afirma que os concretos sujeitos à ação física da cristalização dos sais são aqueles com elevada relação água/cimento (a/c), ou seja, concretos porosos e permeáveis, e que estejam em contato com soluções de alta concentração salina. A condição mais desfavorável é quando são expostos a períodos de secagem e umedecimento, favorecendo a cristalização, ou quando possuem superfícies com condições diferenciadas de saturação e aeração. Essas condições geram o fluxo da solução, com a percolação em uma das faces e a evaporação na face oposta, fazendo com que haja um aumento contínuo da concentração salina.

Segundo Magalhães (2011), além da fissuração, outra manifestação patológica devida a cristalização de sais nos poros do concreto é o escamamento por sal, sintoma típico de concreto poroso exposto a sais hidratáveis, como o sulfato de sódio ou carbonato de sódio.

De acordo com o DNIT (2006), outro exemplo dessa manifestação patológica é o caso de um muro de arrimo ou laje de um concreto permeável que, de um lado está em contato com uma solução salina e, do outro lado está sujeito à evaporação, o concreto pode deteriorar-se por tensões resultantes da pressão de sais que cristalizam nos poros (Figura 7).



Figura 7 – Descamação do concreto ocasionado pela cristalização de sais nos poros.
Fonte: FREITAS Jr, 2008

3.4.3.3. *Retração Hidráulica do Concreto no Estado Fresco*

Durante o lançamento e adensamento do concreto, pode ocorrer a sedimentação das partículas sólidas, por gravidade, e a exsudação (ascensão) do ar aprisionado e da água para a superfície do concreto fresco, fenômeno que produz a fissuração por assentamento plástico. Caso a evaporação da água da superfície for mais rápida do que a exsudação, podem ocorrer fissuras por retração plástica (SANTOS, 2012).

Nunes e Figueiredo (2007), afirma que na retração plástica, conforme Figura 8, a perda da água exsudada para a superfície, devido à evaporação, ou perda de água por sucção das formas, forma uma série complexa de meniscos capilares que criam pressões capilares negativas que provocam contração volumétrica da pasta de cimento. Esta contração, uma vez restringida, seja pela presença de agregados de grandes dimensões ou pela armadura, provocará tensões de tração e posteriormente, a fissuração. As tensões de tração também podem surgir em decorrência de variações diferenciais de volume por toda a massa de concreto, visto que os efeitos da retração não são uniformes por todo o concreto.

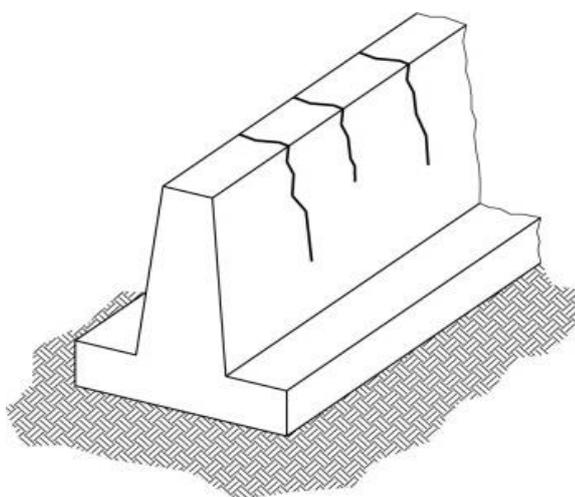


Figura 8 – Fissuração típica de retração em muro.
Fonte: FREITAS Jr, 2008

3.4.3.4. *Efeito dos Gradientes Térmicos nas Estruturas de Concreto*

Os dois principais mecanismos de deterioração do concreto armado devido aos gradientes térmicos são: Retração térmica, o qual acontece durante o estado fresco, e a Dilatação térmica que acontece após o estado fresco.

- Retração Térmica do Concreto

Segundo Hasparyk et al. (2005 apud SANTOS, 2012), após o lançamento do concreto fresco, iniciam-se as reações de hidratação do cimento, as quais são exotérmicas, ou seja, reações que liberam grande quantidade de calor. Assim, esse calor eleva a temperatura do concreto fresco durante as primeiras horas. E havendo à interação com as condições climáticas do ambiente, a temperatura do concreto fresco sofre redução e, conseqüentemente, a diminuição do seu volume, originando tensões térmicas que irão tracionar a peça de concreto, gerando fissuração de origem térmica, conforme Figura 9.



Figura 9 – Fissuração típica de retração térmica.

Fonte: AOKI; MEDEIROS. No prelo.

A temperatura interna do concreto fresco é alta devido as reações de hidratação do cimento. Caso a temperatura externa for elevada, maior será a degradação à qual a estrutura estará sujeita. Quanto maior for o gradiente térmico, maiores serão as trações térmicas na peça e, conseqüentemente, maior será o esforço exercido pela base para restringir a expansão da peça e, naturalmente, maior será a fissuração no concreto armado (SANTOS, 2012).

- Dilatação Térmica do Concreto

Segundo Oliveira (2012), com a variação da temperatura durante o dia, os componentes de uma construção sofrem movimentação devido a dilatação ou contração. Tais variações produzem diferença dimensional nos elementos estruturais da construção. Os movimentos de dilatação e contração são restringidos pelos diversos vínculos que envolvem os elementos e componentes, e assim, desenvolvendo-se nos materiais, tensões que poderão provocar o surgimento de fissuras, conforme Figura 10.

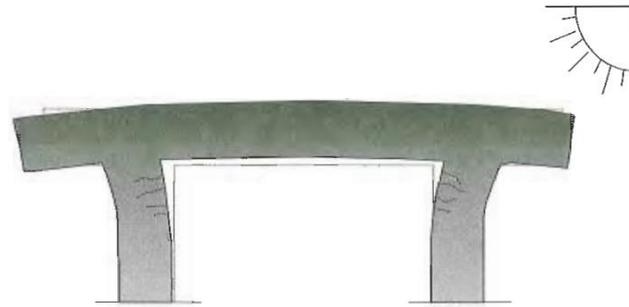


Figura 10 – Fissuração típica de dilatação térmica.
Fonte: Adaptado de EMMONS, 1994.

O concreto, assim como todos os materiais, sofre variação volumétrica quando submetido à variação da temperatura. Um aumento na temperatura provoca, na estrutura de concreto, sua expansão. Quando a temperatura diminui, o volume da estrutura também diminui, ocasionando a contração do concreto, de acordo com a Figura 11. O coeficiente de dilatação linear térmica do concreto é de $9,0 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$ (EMMONS, 1994).

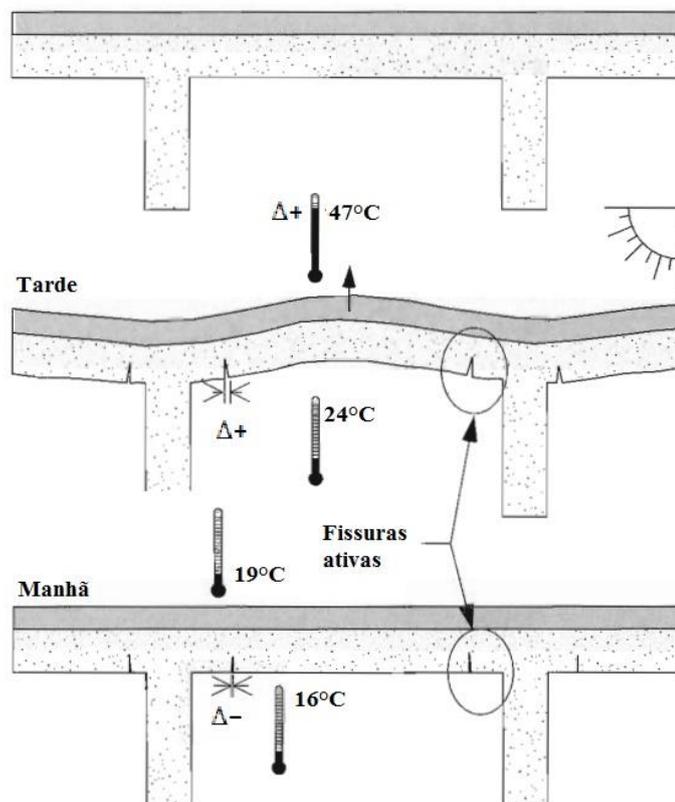


Figura 11 – Fissuração devido a variação volumétrica causada pela variação térmica.
Fonte: Adaptado de EMMONS, 1994.

3.4.3.5. Ação do Fogo na Estrutura de Concreto Armado

Morales et al. (2011) afirmam que o concreto é composto por diferentes materiais que não reagem da mesma forma diante da ação do fogo, tornando-se um problema. O efeito da elevação da temperatura sobre o concreto e as argamassas de cimento é pequeno e de certa forma irregular até os 250°C. Quando essa elevação da temperatura ultrapassa os 300°C a integridade da estrutura é comprometida, principalmente nos casos em que esta elevação é seguida do resfriamento rápido.

Para Haddad (1992 *apud* SOUZA; RIPPER, 1998), a análise do desempenho de uma edificação quando submetida à ação do fogo é feita através da reação e da resistência ao fogo dos elementos da construção, conforme Figura 12.



Figura 12 – Edifício na Espanha com sua estrutura de concreto armado degradada pela ação do fogo.

Fonte: FREITAS Jr, 2008

3.4.4. Causas Químicas

De acordo com o DNIT (2006), as causas químicas da deterioração das estruturas de concreto armado podem ser divididas em três categorias:

- Hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura;
- Trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento;

- Reações causadoras de produtos expansíveis, sendo a expansão por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão da armadura no concreto.

Poggiali (2009 apud SANTOS, 2012), afirma que a degradação química do concreto ocorre devido às causas externas à estrutura (reação dos agentes externos com os constituintes da pasta de cimento) e causas internas (reações internas ao concreto, como reação álcali-agregado, etc.)

3.4.4.1. Reação Álcali-agregado

A reação álcali-agregado (RAA) é um mecanismo de deterioração do concreto e que pode desencadear problemas tanto em nível estrutural como operacional. Dependendo das condições que a estrutura de concreto está exposta, esta reação gera expansões internas que podem ser observadas em diferentes idades, dependendo do grau de relatividade do agregado (HASPARYK, 2005 apud SANTOS, 2012).

Para Lima (2009), a RAA é um fenômeno que ocorre no concreto endurecido e que se desenvolve devido à combinação de três agentes:

- **Teor de Álcalis do Cimento** – Se o conteúdo alcalino do cimento for menor que 0,6%, não ocorrem danos provenientes da RAA. Agora, em concretos contendo o consumo muito alto de cimento há possibilidade de ocorrência de danos até para concentração de álcalis menor que 0,6%. A concentração de álcalis é decisiva para a ocorrência de reação e depende do teor de álcalis do cimento, do suprimento de álcalis das circunvizinhanças e dos consumos de água e cimento do concreto;
- **Agregados** – Determinados fatores são necessários para que sejam reativos a álcalis, como temperatura e tamanho das partículas, têm-se os silicatos ou minerais de sílica, sílica hidratada ou amorfa, podendo reagir com soluções alcalinas, porém diversas dessas reações são insignificantes;
- **Umidade e Temperatura** – Tem um importante papel no desencadeamento da reação. O gel da RAA contendo baixos teores de cálcio tem grande aumento de absorção de água com o aumento da umidade.

Souza e Ripper (1998) afirma que a RAA pode ser classificada de três formas, em função do tipo e mineralogia do agregado reativo envolvido, que são:

- **Reação álcali-sílica** – É o tipo de reação mais conhecida e que normalmente ocorre mais rapidamente;
- **Reação álcali-silicato** – Se desenvolve de forma mais lenta, sendo pouco difundida e compreendida. Os minerais reativos envolvidos são alguns tipos de silicatos presentes em agregados provenientes de rochas sedimentares (argilitos, siltitos, etc.), metamórficas (ardósias, gnaisses, xistos, quartzitos, etc.) e ígneas (granitos);
- **Reação álcali-carbonato** – É uma interação química entre os álcalis e as dolomitas presentes nos calcários dolomíticos, resultando a formação de brucita – $Mg(OH)_2$ – sem que aconteça a dissolução do sólido primitivo, acarretando a expansão e fissuração do concreto.

O concreto sob RAA exibe em sua superfície fissuração. Uma vez iniciada a fissuração, maior será a penetração de umidade/água no interior do concreto, conforme apresenta as Figuras 13 e 14, acelerando ainda mais a reação álcali-agregado e comprometendo as propriedades mecânicas e elásticas do concreto, além de reduzir sua durabilidade (HASPARYK, 2005 apud SANTOS, 2012).

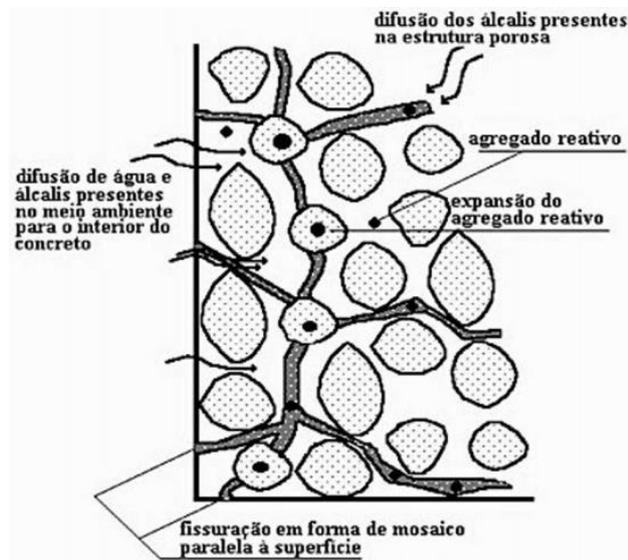


Figura 13 – Desenvolvimento da reação álcali-agregado no concreto.

Fonte: SOUZA; RIPPER, 1998.



Figura 14 – Reação álcali-agregado em bloco de fundação.
Fonte: FREITAS Jr, 2008

3.4.4.2. Ataque por Sulfatos

De acordo com o DNIT (2006), a degradação do concreto em consequência de reações químicas entre o concreto de cimento Portland e íons de sulfato de uma fonte externa, podem ocorrer manifestações de duas formas distintas: pela expansão do concreto ou pela perda progressiva de resistência e perda de massa. Santos (2012), afirma que entre os sulfatos que atacam o concreto, destacam-se o Sulfato de Sódio (Na_2SO_4), o Sulfato de Magnésio (MgSO_4), Sulfato de Potássio (K_2SO_4) e o Sulfato de Cálcio (CaSO_4).

Costa (2004) afirma que, o concreto ao ser atacado por sulfatos adquire externamente uma coloração esbranquiçada, conforme Figura 15.

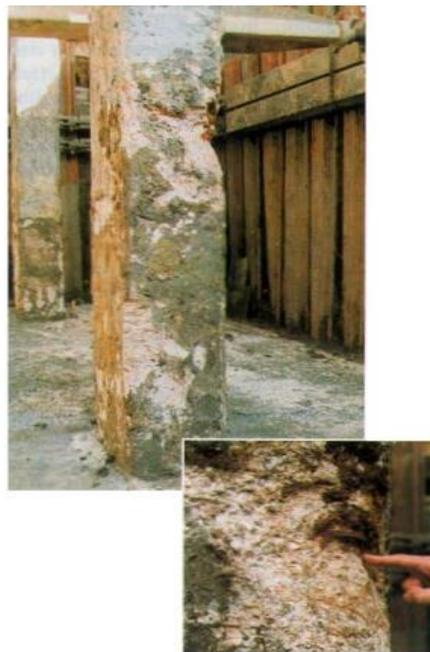


Figura 15 – Degradação do pilar por ação de sulfatos.
Fonte: COUTINHO, 2001.

3.4.4.3. Ataque por Ácidos

Souza e Ripper (1998), afirmam que, são vários os tipos de ácidos que afetam o concreto (Figura 16), sendo eles classificados em orgânicos (clorídrico, sulfídrico, nítrico, carbônico, etc.) ou inorgânico (acético, esteárico, etc.).



Figura 16 – Pilar com armadura exposta.
Fonte: FREITAS Jr, 2008.

Santos (2012) afirma que, os ácidos reagem com o elemento de carácter básico da pasta de cimento (hidróxido de cálcio), produzindo água e sais de cálcio, como mostra a equação abaixo.



Os sais de cálcio podem ser muito ou pouco solúveis, dependendo do tipo de ácido. Quanto mais solúvel o sal de cálcio, mais fácil o mesmo de ser lixiviado, aumentando a porosidade e a permeabilidade da pasta de cimento, e assim favorecendo a entrada de outros agentes de deterioração. Se o sal de cálcio gerado na reação for pouco solúvel ou mesmo insolúvel, o mesmo irá atacar o concreto de forma lenta, mas completamente inofensivos, já que os sais de cálcio quando depositados nos poros, diminuem a permeabilidade do concreto à água (BAUER, 2011).

Andrade (2005) sugere algumas medidas preventivas para minimizar a degradação por ataque de ácidos, que são:

- Adotar baixa relação a/c no concreto;
- Cuidados no transporte, lançamento e adensamento, com cura adequada;

- Uso de adições minerais (como pozolanas) é favorável, já que fixam o hidróxido de cálcio – Ca(OH)_2 – componente da pasta de cimento mais vulnerável ao ataque de ácidos.

3.4.4.4. Ataque por Água Pura

As águas subterrâneas, de lagos e de rios contêm pequenas quantidades de cloretos, sulfatos, e bicarbonatos de cálcio e de magnésio. A água pura da condensação da neblina ou vapor de água e a água mole da chuva ou da neve e do gelo derretidos contêm pouco ou nenhum íon de cálcio. Quando estas águas entram em contato com a pasta de cimento Portland, tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos que contêm cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

“A agressividade das águas puras é função direta da sua velocidade, da quantidade de água que atua sobre o concreto e do seu tempo de permanência (águas empoçadas). A evidência mais comum desta ação é a dissolução do hidróxido de cálcio, seguida de precipitação de géis, com a conseqüente formação de estalactites e estalagmites” (SOUZA; RIPPER, 1998)

O produto lixiviado interage com o CO_2 presente no ar e forma uma crosta esbranquiçada de carbonato de cálcio na superfície, fenômeno esse conhecido como eflorescência, conforme Figura 17 (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

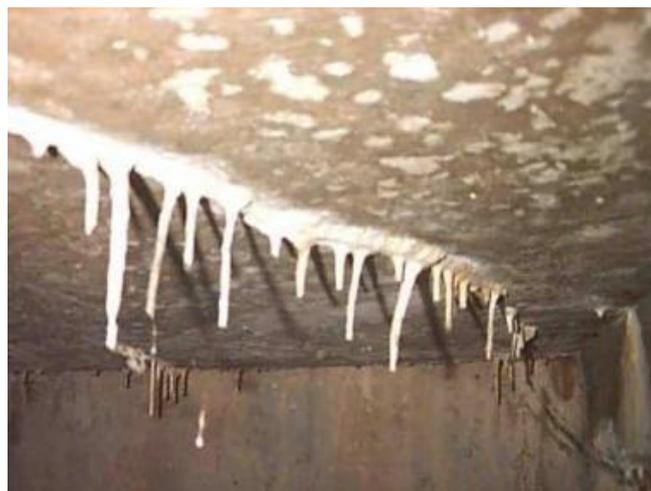
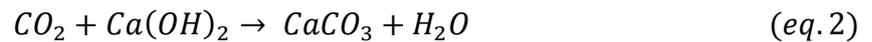


Figura 17 – Lixiviação da pasta de cimento.
Fonte: AGUIAR (2011) *apud* SANTOS (2012).

3.4.4.5. Carbonatação

Para Andrade (2001), nas superfícies expostas de concreto, a alcalinidade da camada de revestimento pode diminuir pela penetração do gás carbônico (CO_2) por difusão através da rede de poros do material, que reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dando origem ao fenômeno da carbonatação. A reação principal desse processo é representada pela eq. 2.



O dióxido de carbono reage com o hidróxido de cálcio em meio aquoso, fazendo com que o pH passe de 12,5 para níveis próximos a 9. E reduzindo as condições de estabilidade química da proteção passivadora que envolve a armadura (ANDRADE, 2001). A Figura 18 apresenta de forma resumida o fenômeno da carbonatação.

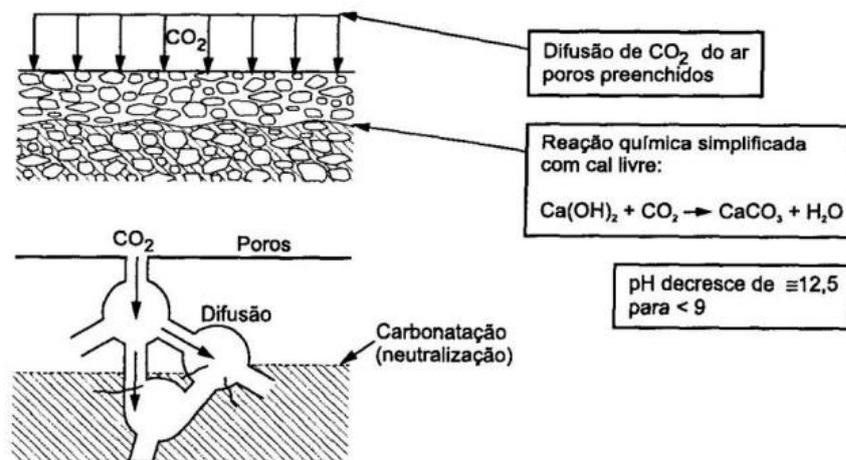


Figura 18 – Esquemática do fenômeno de carbonatação.
 Fonte: TASCA, 2012.

Tasca (2012) afirma que com a baixa alcalinidade e com a presença de oxigênio associado com umidade, pode se iniciar o processo de corrosão do aço no interior do concreto. Esta corrosão é considerada um dos principais meios de degradação das estruturas de concreto armado.

A Figura 19 mostra o avanço da carbonatação até atingir a armadura, despassivando-a e deflagrando o processo de corrosão. O avanço da carbonatação no concreto armado está diretamente relacionado com a facilidade que CO_2 encontra para espalhar-se através da camada de revestimento do concreto em um intervalo de tempo (TASCA, 2012).

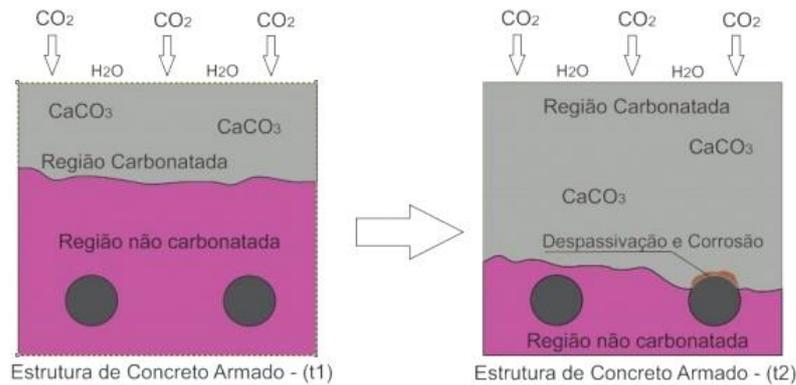


Figura 19 – Avanço da carbonatação na estrutura de concreto armado
Fonte: TASCA, 2012

Segundo Cascudo (1997), a penetração do CO_2 depende de como o concreto foi lançado, adensado e curado, bem como do tipo de cimento, das condições ambientais e de umidade do ambiente, sendo maior a carbonatação quanto maior a relação a/c. Essas condições determinam a microestrutura, principalmente, no que se refere à distribuição dos poros.

Existem várias técnicas utilizadas para verificar o avanço da carbonatação nas peças de concreto, tais como a difração de raios-x, análise térmica diferencial, termogravimetria, dentre outras. Entretanto, a mais utilizada para a comprovação da carbonatação é através de indicadores químicos de pH, à base de fenolftaleína ou timolftaleína. Com a aplicação da solução alcoólica de fenolftaleína, a região não carbonatada adquire a coloração róseo-avermelhada (Figura 20).

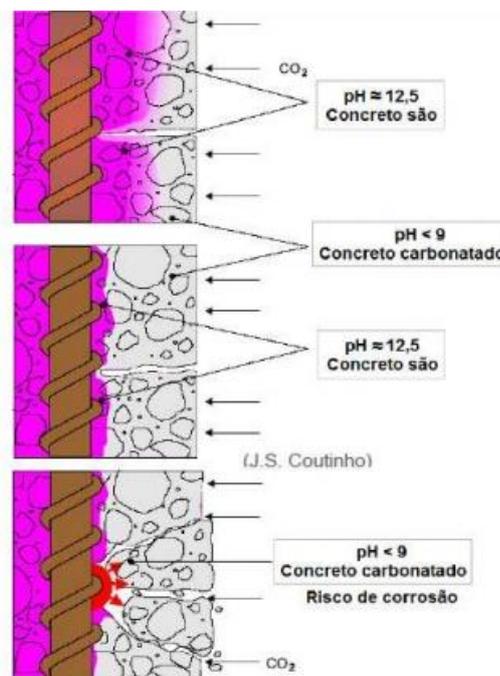


Figura 20 – Avanço da carbonatação, indicada por teste à base de fenolftaleína.
Fonte: FREITAS Jr, 2008.

3.4.4.6. Ataque por Cloretos

Os cloretos podem ser acrescentados independente ao concreto a partir da utilização de aditivos aceleradores do endurecimento, de agregados e de águas contaminadas. Até mesmo, penetrar no concreto ao aproveitarem-se de sua estrutura porosa (SOUZA; RIPPER, 1998).

Os íons de cloreto que penetram no interior do concreto são responsáveis pelo aumento da condutividade elétrica do eletrólito causando a corrosão das armaduras, conforme Figura 21. A taxa de penetração de cloreto através do concreto depende de diversos fatores, que incluem o local onde a estrutura de concreto está localizada, a água e o oxigênio (MEDEIROS; HELENE, 2003).

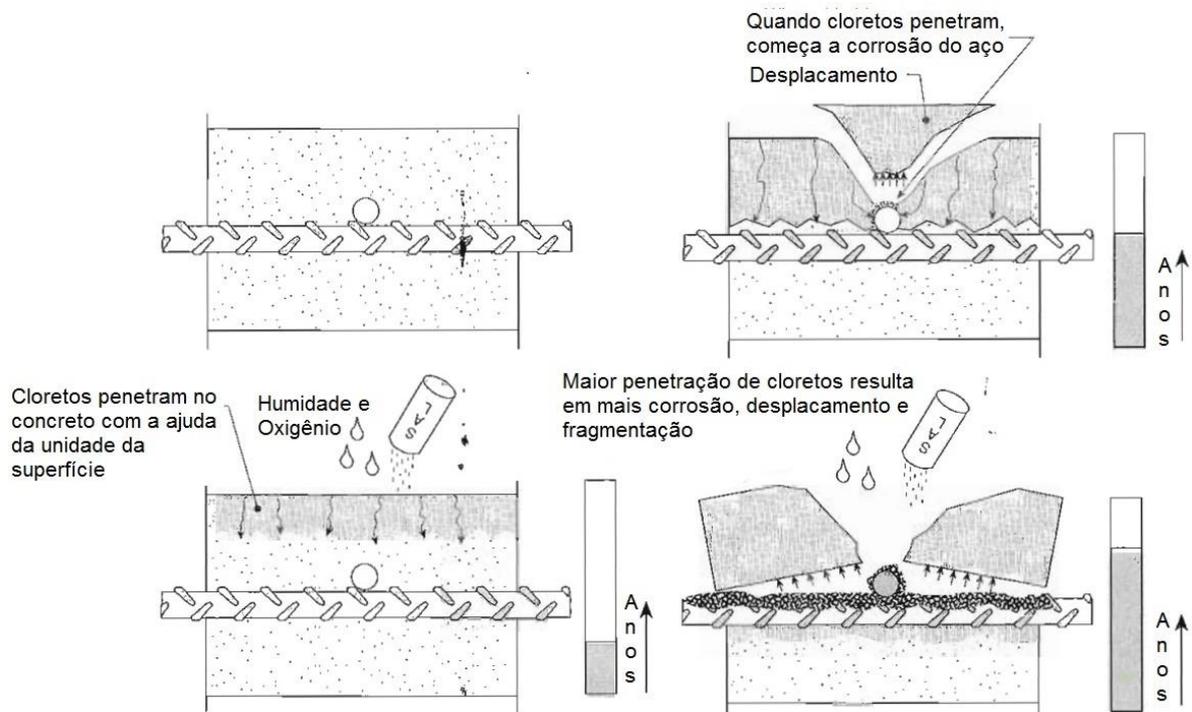


Figura 21 – Penetração de cloretos em concreto submetido à umidade e início à corrosão.

Fonte: Adaptado de EMMONS, 1994.

Segundo Mota et al. (2012), existem quatro mecanismos de penetração dos cloretos, que são:

- **Absorção Capilar** – Primeira etapa para a penetração de íons de cloreto na superfície do concreto. Depende da porosidade, permitindo o transporte de líquidos para o interior do concreto. Quanto menores forem os poros conectados do concreto, mais intensas serão as forças capilares de sucção;
- **Difusão Iônica** – É o ambiente predominante do movimento dos cloretos no interior do concreto e acontece quando o cloreto ultrapassa a camada superficial. Neste ponto

ocorre à procura de equilíbrio através da diferença de concentração de cloretos, entre o exterior e interior do concreto, promovendo a movimentação dos íons;

- **Permeabilidade** – Principais indicadores da qualidade de um concreto e é descrita como a facilidade com que uma substância atravessa o concreto. É um parâmetro que depende da qualidade e dimensões dos poros, ou seja, estar sujeito à relação a/c do concreto, quanto menor for este fator, menos permeável será o concreto;
- **Migração Iônica** – É possível a partir do campo gerado pela corrente elétrica do processo de corrosão eletroquímica da armadura. Por meio da corrente elétrica gerada na corrosão ou através de campos elétricos externos, os cloretos podem ser induzidos a movimentar-se pela rede de poros do concreto.

Missau (2004) afirma que, em regiões litorâneas, a atmosfera é intensificada com os íons cloreto. As partículas da água do mar contendo sais dissolvidos, quando em suspensão na atmosfera, são levadas pelo vento e podem depositar nas estruturas, possibilitando que o cloreto penetre por absorção ou difusão, como mostra a Figura 22.

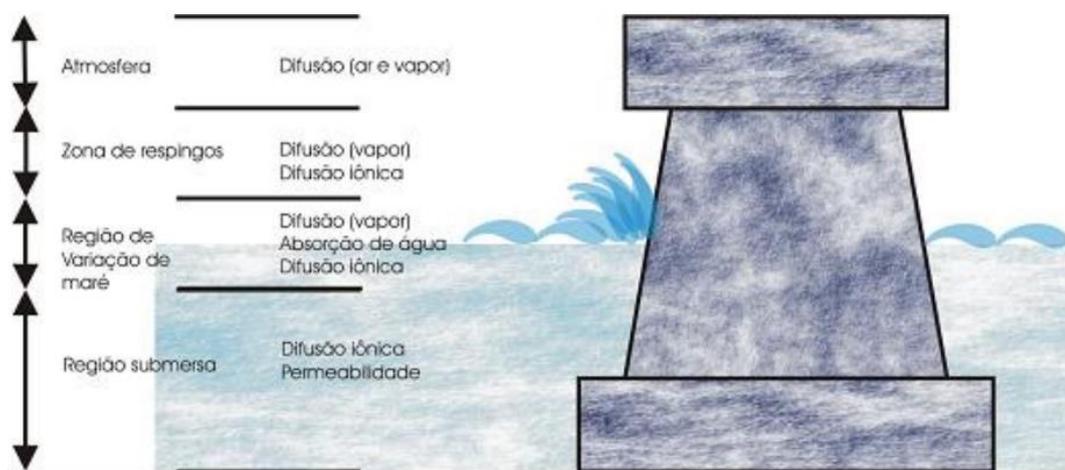


Figura 22 – Atuação simultânea de diversos mecanismos de transporte em uma estrutura.

Fonte: MISSAU, 2004.

3.4.5. Causas Eletroquímicas

De acordo com Cascudo (1997), não há corrosão na armadura de uma estrutura de concreto armado se o concreto que a protege não sofrer contaminações e/ou deterioração. Assim, quanto mais inalterado se mantiver o concreto, maior será a proteção da armadura.

Os metais encontram-se na natureza geralmente na forma de compostos, tais como óxidos e sulfetos, com outros elementos. O metal é extraído mediante um processo de redução, o que

requer aplicar uma certa quantidade de energia. O processo inverso que o metal volta ao seu estado natural é acompanhado de uma redução de sua energia, isto é, uma reação espontânea. Este processo que corresponde a uma oxidação, é conhecido por corrosão e representa a lenta destruição do metal (ANDRADE, 1992 *apud* LAPA, 2008).

Cascudo (1997) classifica a corrosão, segundo a natureza do processo, em: química (corrosão seca ou oxidação) e eletroquímica (corrosão aquosa). A primeira se dá por uma reação gás-metal, com formação de uma película de óxido, cujo é um processo lento e não provoca deterioração superficial do metal, só quando os gases são extremamente agressivos. Já a corrosão eletroquímica ou aquosa é a que efetivamente traz problemas às obras civis. Trata-se de um ataque de natureza eletroquímica, que ocorre no meio aquoso, como resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão eletroquímica.

Cascudo (1997) classifica a corrosão eletroquímica do aço, quanto a morfologia do processo, em três tipos mais comuns:

- **Corrosão Generalizada** – Ocorre de maneira generalizada em toda a superfície do metal, podendo ser uniforme, com a superfície tendendo a ser lisa e regular, ou não uniforme, apresentando superfície rugosa e irregular;
- **Corrosão por Pite (ou Puntiforme)** – É um tipo de corrosão localizada, na qual há pontos de formação de degaste definidos a superfície metálica, os quais evoluem aprofundando-se, podendo causar a ruptura pontual da barra. Na maioria dos casos, ocorrem na forma de depressões rasas e de maior diâmetro ao longo das barras de aço;
- **Corrosão sob tensão** – Outro tipo de tensão localizada, a qual se dá simultaneamente com uma tensão de tração na armadura, podendo originar fissuras na estrutura do aço. Ocorre eminentemente em estruturas protendidas, mas também pode ocorrer em estruturas de concreto armado. Em ambientes ricos em cloretos e com elevados níveis de tensão, a velocidade de ocorrência deste tipo de corrosão é maior e sua incidência é preocupante.

A Figura 23 apresenta, a atuação dos três tipos de corrosão segundo a sua morfologia.

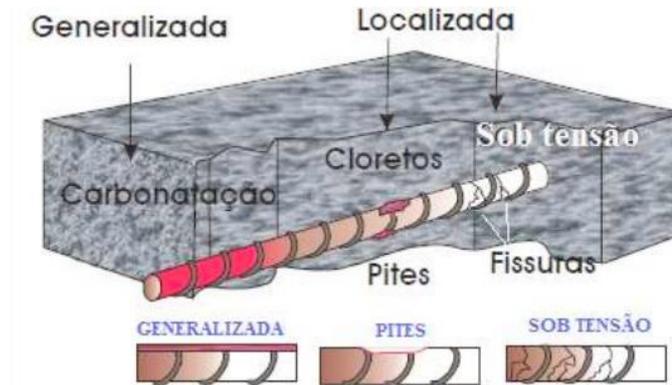


Figura 23 – Os três tipos de corrosão segundo a morfologia.
Fonte: Adaptado de SANTOS (2012)

Um outro tipo de corrosão seria a corrosão galvânica, conforme Figura 24. Este tipo de corrosão ocorre quando há contato entre diferentes tipos de metal em um mesmo meio eletrolítico. O metal com menor atividade eletroquímica é corroído (AGUIAR, 2006 *apud* SANTOS, 2012).

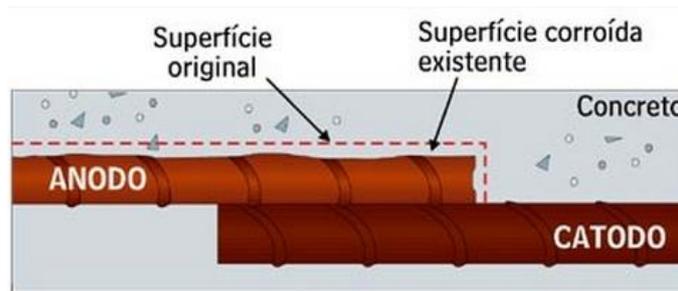


Figura 24 – Pilha eletroquímica por corrosão galvânica em concreto armado.
Fonte: Adaptado de SANTOS (2012).

A armadura de aço, ao sofrer a corrosão, sofre perda de seção na região anódica, devido à dissolução do ferro, resultando na perda de aderência do aço com o concreto, na redução da capacidade estrutural da peça e no surgimento de manchas de coloração marrom-alaranjada, como mostra a Figura 25. Assim, devido às tensões internas expansivas provenientes dos produtos da corrosão, o lascamento do concreto e o destacamento da camada de cobertura se dará na zona anódica (SANTOS, 2012).



Figura 25 – Perda de seção na barra de aço devido à corrosão eletroquímica.
Fonte: Adaptado de EMMONS (1994).

As fases da corrosão eletroquímica na armadura metálica do concreto armado, podem ser ilustradas pela Figura 26, desde a penetração dos agentes agressivos até o lascamento do concreto.

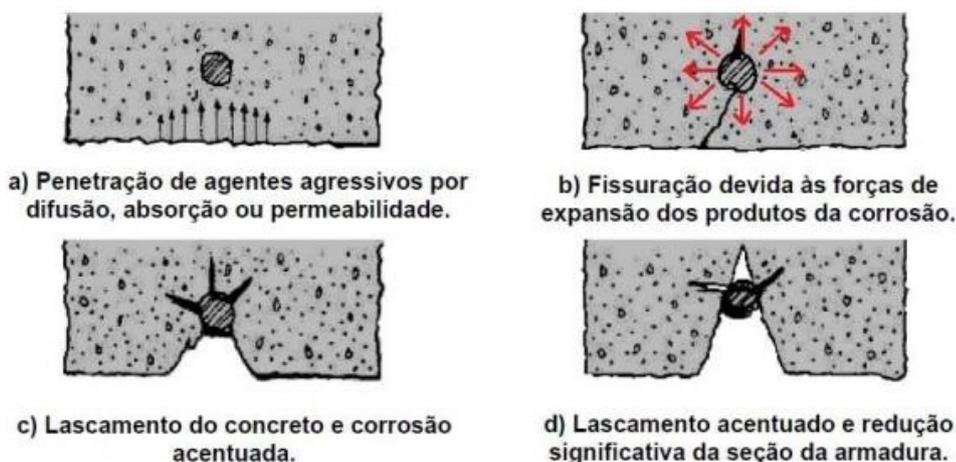


Figura 26 – Fases da instalação da corrosão em uma armadura.

Fonte: SANTOS, 2012.

Segundo Cascudo (1997), as fissuras resultantes da corrosão do aço se estabelece na direção paralela à barra corroída e podem ser classificadas como fissuras ativas progressivas, cujas aberturas vão aumentando com o decorrer do processo corrosivo (Figura 27). Este progresso das fissuras implica no lascamento do concreto e no destacamento da camada de cobrimento, deixando expostas as armaduras.

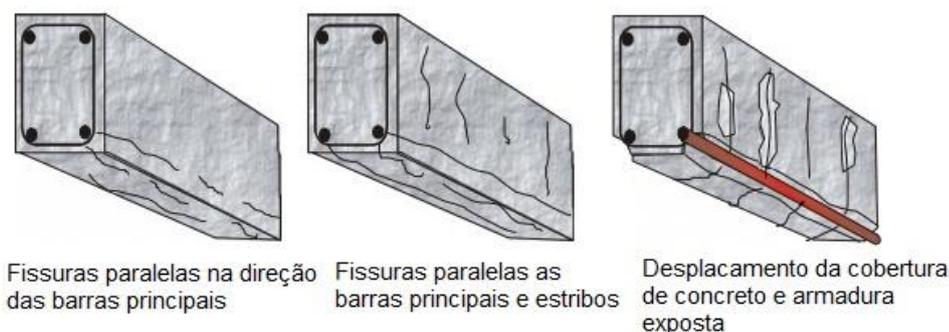


Figura 27 – Progresso das fissuras em um processo corrosivo.

Fonte: POLITO, 2006.

Nem sempre se produz fissuração quando as armaduras se corroem. Caso o concreto esteja muito úmido, os óxidos serão gerados a uma velocidade constante e podem emigrar através da rede de poros, surgindo na superfície sob a forma de manchas marrom-avermelhadas, sem nenhuma fissura. Entretanto, pode ocorrer as duas situações simultaneamente: fissuras acompanhadas de manchas corrosivas (CASCUDO, 1997).

4 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso buscou realizar inspeções visuais em três pontes de concreto armado da PB-073, entre os municípios de Belém e Tacima no estado da Paraíba. Nesse capítulo serão apresentados os dados coletados em cada ponte com ampla documentação fotográfica. A identificação das manifestações patológicas e possíveis tratamentos para as mesmas são comentados de maneira breve.

As contribuições apresentadas neste capítulo não são conclusivas, sendo passíveis de alteração quando da elaboração de projeto de reparo, reforço ou programa de manutenção de cada caso.

4.1. Ponte sobre o Riacho da Picada (Ponte 01)

A primeira ponte em estudo situa-se nas proximidades do município de Belém-PB e sobre o riacho da Picada, sendo a principal ligação entre vários municípios confrontantes. No Quadro 1 apresentam-se as dimensões e localização da ponte.

Quadro 1 – Dimensões e Localização da Ponte 01.

LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	PISTA DE ROLAMENTO (m)	ALTURA (m)	LOCALIZAÇÃO: Coordenadas em UTM, Fuso 25S
10,0	26,00	8,20	5,40	N 9260831 m E 219139 m

A Ponte 01 serve de acesso contínuo de veículos, conforme apresenta as Figuras 28 e 29. Na Figura 30 apresenta-se uma visão inferior da ponte e as vigas principais com seção variável crescente junto aos apoios e vigas secundárias ligadas com a laje do tabuleiro.

Algumas das manifestações patológicas verificadas foram: a vibração excessiva quando a mesma é solicitada, principalmente, durante a passagem dos veículos pesados, como caminhões e ônibus; também observou-se a deterioração dos guarda-corpos e passeio, conforme as Figuras 31 e 32, devido ao choque de veículos automotores, comprometendo a capacidade resistente da estrutura. Esses impactos provocam o aparecimento de fissuras que facilitam a entrada de agentes agressivos na estrutura.

A Figura 33 mostra a interrupção da funcionalidade das juntas de dilatação que aumenta os efeitos provocados pela variação temperatura.

De acordo com a Figura 34 é possível identificar a descamação do concreto ocasionado pela ação física da cristalização dos sais (ver detalhe “A”) que podem ser causadas por elevada

relação a/c, ou seja, concretos porosos e permeáveis, e que estejam em contato com soluções de alta concentração salina, sendo que a região possui rios com quantidade considerada de sais.

As variações térmicas diárias e sazonais provocam uma oscilação tridimensional. Estes movimentos de dilatação e contração são restringidos pelos diversos vínculos que envolvem os materiais, gerando tensões que podem provocar trincas ou fissuras. Assim, como há a interrupção da trabalhabilidade das juntas de dilatação, o tabuleiro tende-se a dilatar, estando impedido, o que causa o arqueamento da estrutura (ver detalhe “B”). Há também, a presença de eflorescência (ver detalhe na figura “C”) que é a migração de sais solúveis para a superfície do concreto, os quais se cristalizaram, proveniente da carbonatação (Figura 34).

A Figura 35 expõe o acúmulo de solo sobre a ponte, obstruindo o sistema de drenagem, promovendo infiltrações generalizadas. Esse problema corrobora para o surgimento de diversas manifestações patológicas.



Figura 28 – Vista Geral da Ponte.
Fonte: própria.



Figura 29 – Vista do Tráfego.
Fonte: própria.



Figura 30 – Vista Inferior da Ponte 01.
Fonte: própria.



Figura 31 – Deterioração dos guarda-corpos e estrutura danificada. Fonte: própria.



Figura 32 – Deterioração do passeio com armadura exposta. Fonte: própria.



Figura 33 – Interrupção da funcionalidade das juntas de dilatação. Fonte: própria.



Figura 34 – (A) Descamação do concreto, (B) Arqueamento da estrutura e (C) Eflorescência. Fonte: própria.



Figura 35 – Obstrução do sistema de drenagem. Fonte: própria.

No Quadro 2 apresenta-se, de forma resumida, os componentes estruturais afetados, os mecanismos de deterioração, os respectivos sintomas e as sugestões para a reabilitação da estrutura afetada.

Quadro 2 – Componentes, Mecanismos, Sintomas e Sugestões para a Reabilitação da estrutura afetada.

COMPONENTE ESTRUTURAL AFETADO	MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	SINTOMAS	SUGESTÕES PARA A REABILITAÇÃO
Tabuleiro	Comprometimento da rigidez da estrutura	Vibração Excessiva	Deve ser corretamente investigada com auxílio de equipamentos de precisão, aumentando ou diminuindo a rigidez da estrutura, conforme seja necessário.
	Obstrução do sistema de drenagem	Infiltrações corroborando para o surgimento de várias manifestações patológicas (Figura 35)	Tratamentos de proteção da superfície do tabuleiro, drenagem e limpeza contribuiriam na prevenção da corrosão e desgaste do concreto.
Tabuleiro (Face Inferior)	Cristalização de Sais nos poros do concreto	Fissuração e escamamento do Concreto (Figura 34)	A parte deteriorada deve ser removida até profundidade necessária e limpa com ar comprimido ou jato de areia, depois é aplicado argamassa estrutural devendo ser obedecido todas as instruções de seu fabricante (SOUZA; RIPPER, 1998).
Guarda-corpos	Choques e Impactos	Fissuração e lascamento do concreto e perda de armadura (Figura 31)	Implantação de novos e restauração dos antigos.
Passeio	Choques e Impactos	Fissuração e lascamento do concreto e perda de armadura (Figura 32)	Deve-se realizar reparo estrutural das armaduras oxidadas através dos procedimentos de apicoamento manual com remoção do concreto degradado e limpeza das superfícies, tratamento da ferragem que se encontra exposta e oxidada através da utilização de uma escova metálica ou jato de areia, selando-as, para posterior aplicação de uma camada de argamassa estrutural (EMMONS, 1994)
Vigas	Carbonatação	Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço, abrindo caminho para a corrosão do aço (Figura 34)	A parte deteriorada deve ser removida até profundidade necessária e limpa com ar comprimido ou jato de areia, depois é aplicado argamassa estrutural devendo ser obedecido todas as instruções de seu fabricante.
	Eflorescência	Consequência da Carbonatação (Figura 34)	Pode ser removida por processos simples, tais como: escovação com escova dura e seca, escovação com escova e água, leve jateamento d'água e leve jateamento de areia.
Juntas	Interrupção do Funcionamento	Bloqueio da dilatação térmica da estrutura, causando fissuras em toda superestrutura (Figura 33)	Devem ser restauradas e deixadas livres de qualquer tipo de material que impeça seu livre funcionamento.

4.2. Ponte sobre o Rio Dantas (Ponte 02)

O segundo caso em estudo, trata-se de uma ponte construída nas proximidades do município de Belém-PB e sobre o rio Dantas. No Quadro 3 apresentam-se as dimensões e localização da ponte.

Quadro 3 – Dimensões e Localização da Ponte 02.

LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	PISTA DE ROLAMENTO (m)	ALTURA (m)	LOCALIZAÇÃO: Coordenadas em UTM, Fuso 25S
9,60	14,50	7,60	5,00	N 9263748 m E 219074 m

Com o aumento do fluxo de veículos sobre a Ponte 02, houve a necessidade da ampliação da pista de rolamento, por isso, existem duas pontes em paralelos. A ponte serve de passagem constante de carros de passeio, ônibus e caminhões conforme apresenta as Figuras 36 e 37).

A Figura 38 apresenta uma vista inferior da ponte. Nesta figura nota-se as duas pontes paralelas, onde os encontros de contenção usam sistemas estruturais distintos, sendo: muro de gravidade e parede de concreto armado, complementados por alas laterais.

Durante a inspeção verificou-se vibração excessiva, até mesmo com veículos de pequeno porte. Também observou-se a deterioração dos guarda-corpos que estão com as armaduras corroídas provocando o lascamento do concreto (Figura 39). Na Figura 40 nota-se os encontros com destacamento do concreto de cobrimento, provocado pela expansão devido à oxidação ou dilatação das armaduras.

Observa-se que o mecanismo de ação da corrosão na superestrutura, dá-se por influência de cloretos (a região possui rios com quantidade considerada de sais) e por carbonatação, agentes estes presentes no ambiente. Na ação de cloretos, os íons apresentam a capacidade de romper a camada de óxido que protege as armaduras em estruturas de concreto (película protetora passiva), ao mesmo tempo em que facilitam a dissolução do cimento. Dessa maneira, expõem a armadura a variados mecanismos de deterioração que, em geral, são processos puramente químicos ou eletroquímicos. Através de tais fatos, percebe-se um insuficiente cobrimento utilizado aliado a um concreto empregado com alta porosidade, resultado de dosagem inadequada, o que pode ter ocorrido tanto no período de projeto como na execução.

A carbonatação resultou na diminuição da alcalinidade do cimento, em função da reação do hidróxido de cálcio com compostos do meio, produzindo principalmente sais de cálcio. Esse processo determinou uma fragilidade no cimento e também expôs as armaduras ao contato com

o meio, como pode ser visto na Figura 41. A Oxidação da armadura causou diminuição de sua seção transversal e conseqüentemente a diminuição de sua resistência a flexão.

A fissuração na superfície do muros de gravidade pode ser indicador de uma possível reação álcali-agregado, já que uma vez iniciada a fissuração, maior será a penetração de umidade no interior do concreto, acelerando ainda mais a reação álcali-agregado e comprometendo as propriedades mecânicas e elásticas do concreto, além de reduzir sua durabilidade (Figura 42). A ausência de pingadeiras na face inferior da laje em balanço tem como principais conseqüências a degradação do concreto (Figura 43).

Na Figura 44 apresenta-se a interrupção da funcionalidade das juntas de dilatação que aumenta os efeitos provocados pela variação da temperatura.

Percebe-se defeitos na camada de revestimento asfáltico que recobre a ponte, falhas estas encontradas evidenciam a falta de manutenção da rodovia, uma vez que o mesmo já atingiu o fim de sua vida útil, apresentando desgaste superficial e evolução para “panelas”. Tais defeitos afetam o conforto e segurança dos usuários, além de, contribuírem para a deterioração do tabuleiro da ponte (Figura 44).



Figura 36 – Vista do Trafego.
Fonte: própria.



Figura 37 – Vista Geral da Ponte.
Fonte: própria.



Figura 38 – Vista Inferior da Ponte.
Fonte: própria.



Figura 39 – Deterioração do Guarda-corpo.
Fonte: própria.



Figura 40 – Destacamento do concreto de cobrimento. Fonte: própria.



Figura 41 – Ataque por carbonatação produzindo sais de cálcio. Fonte: própria.



Figura 42 – Fissuração no muro de gravidade. Fonte: própria.



Figura 43 - Ausência de pingadeira da laje em balanço. Fonte: própria.



Figura 44 – Falhas na pavimentação. Fonte: própria.

O Quadro 4 apresenta-se, de forma resumida, os componentes estruturais afetados, os mecanismos de deterioração, os respectivos sintomas e as sugestões para a reabilitação da estrutura afetada.

Quadro 4 – Componentes, Mecanismos, Sintomas e Sugestões para a Reabilitação da estrutura afetada.

COMPONENTE ESTRUTURAL AFETADO	MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	SINTOMAS	SUGESTÕES PARA A REABILITAÇÃO
Tabuleiro	Comprometimento da rigidez da estrutura	Vibração Excessiva	Deve ser corretamente investigada com auxílio de equipamentos de precisão, aumentando ou diminuindo a rigidez da estrutura, conforme seja necessário.
Tabuleiro (Face Inferior)	Ausência de Pingadeiras	Degradação do concreto, perda do cobrimento, armaduras aparentes e corroídas (Figura 43)	A parte deteriorada deve ser removida até profundidade necessária e limpa com ar comprimido ou jato de areia, depois é aplicado argamassa estrutural devendo ser obedecido todas as instruções de seu fabricante.
Guarda-corpos	Corrosão das Armaduras	Deterioração e perda de seção do aço; expansão, fissuração e lascamento do concreto (Figura 39)	Implantação de novos e restauração dos antigos.
Encontro (Muro de gravidade)	Reação Álcali-Agregado	Expansão e Fissuração do Concreto (Figura 42)	As trincas devem ser tratadas com argamassa para evitar a entrada de materiais agressivos. Após três a cinco anos, quando muitas trincas estiverem estabilizadas, tratá-las com injeção de epóxi (SOUZA; RIPPER, 1998).
Encontro (Parede de concreto armado)	Oxidação ou dilatação da Armadura	Destacamento, do concreto e perda de armadura (Figura 40)	Deve-se realizar reparo estrutural das armaduras oxidadas através dos procedimentos como remoção do concreto degradado e limpeza das superfícies, tratamento da ferragem que se encontra exposta e oxidada através da utilização de uma escova metálica ou jato de areia, selando-as, para posterior aplicação de uma camada de argamassa estrutural (EMMONS, 1994).
Vigas	Carbonatação	Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço, abrindo caminho para a corrosão do aço (Figura 41)	
	Ataque por Cloretos	Despassivação do aço, posteriormente, corrosão das armaduras (Figura 41)	Remoção do concreto, com limpeza e, às vezes, com substituição de armaduras e com recomposição das partes removidas.
	Eflorescência	Consequência dos cloretos (Figura 41)	Pode ser removida por processos simples, tais como: escovação com escova dura e seca, escovação com escova e água, leve jateamento d'água e leve jateamento de areia.
Juntas	Interrupção do Funcionamento	Bloqueio da dilatação térmica da estrutura, causando fissuras em toda superestrutura (Figura 44)	Serem restauradas e deixadas livres de qualquer tipo de material que impeça seu livre funcionamento.
Pavimentação Asfáltica	Defeitos provocados pelo tráfego de veículos	Infiltração de água na estrutura da laje, desgaste superficial e formação de “painelas” (Figura 44)	Reparo da área degradada da laje e restauração do pavimento

4.3. Ponte sobre o Riacho Carnaúba (Ponte 03)

A terceira ponte em estudo situa-se sobre o riacho de Carnaúba e nas proximidades do povoado Bilinguim, no município de Tacima-PB. No Quadro 5 apresentam-se as dimensões e localização da ponte.

Quadro 5 – Dimensões e Localização da Ponte 03.

LARGURA (m)	COMPRIMENTO (m)	PISTA DE ROLAMENTO (m)	ALTURA (m)	LOCALIZAÇÃO: Coordenadas em UTM, Fuso 25S
9,60	23,00	7,80	5,80	N 9275781 m E 217202 m

A Ponte 03 apresenta tráfego de todos os tipos de veículos, e em alguns períodos do dia o trânsito de veículos é intenso devido ao transporte de alunos até escolas presente na região. A estrutura é constituída por dois vãos de 10,5 m e apoiada pelos encontros e um pilar parede central, conforme Figuras 45 e 46.

A provável causa das fissuras dos encontros são a baixa resistência à tração do concreto ciclópico e tendem a fissurar quando submetidos a movimentos estruturais de diversas origens, entre elas deformações no solo, carregamentos excessivos e variações de temperatura, como mostra a Figura 47.

O início da desagregação dá-se na superfície do concreto, manifestando-se exteriormente por meio de uma mudança de coloração e aumento das fissuras irregulares e distribuídas aleatoriamente, que estão a formar-se, seguindo-se um aumento de volume e uma fragmentação das partes exteriores do concreto, concluindo o processo com a desagregação da massa de concreto, como pode ser notado na Figura 48. Observa-se que o mecanismo de ação da corrosão nos elementos, dá-se por influência de cloretos (a região possui rios com quantidade considerada de sais) e por carbonatação, agentes estes presentes no ambiente.

A ausência de pingadeiras na face inferior da laje em balanço tem como principais consequências a degradação do concreto (Figura 49). A exposição de armaduras corroídas e manchas de ferrugem é notado em grande parte da superestrutura (Figuras 50 e 51). Também formam observados elevados níveis de atuação de agentes patológicos nos passeios, sejam na forma de alto teor de oxidação com exposição das armaduras ou na forma da desagregação do concreto (Figura 52).

Identificou-se os defeitos na camada de revestimento asfáltico que recobre a ponte. As falhas encontradas no pavimento evidenciam a falta de manutenção da rodovia, uma vez que o

mesmo já atingiu o fim de sua vida útil, apresentando desgaste superficial e evolução para “panelas”. Tais defeitos afetam o conforto e segurança dos usuários, além de, contribuírem para a deterioração do tabuleiro da ponte (Figura 53).



Figura 45 – Vista do Tráfego.
Fonte: própria.



Figura 46 – Vista Geral da Ponte.
Fonte: própria.



Figura 47 – Fissura de tração nos encontros.
Fonte: própria.



Figura 48 – Desagregação da massa de concreto.
Fonte: própria.



(a)



(b)

Figura 49 – (a) Ausência de pingadeira na face inferior da laje e (b) Armadura aparente.
Fonte: própria.



Figura 50 – Armadura exposta e perda de seção de viga primária. Fonte: própria.



Figura 51 – Destacamento do concreto de cobrimento e exposição das armaduras. Fonte: própria.



Figura 52 – Oxidação da armadura com perda de cobrimento e trechos desagregados. Fonte: própria.



Figura 53 – Deterioração do pavimento. Fonte: própria.

O Quadro 6 apresenta-se, de forma resumida, os componentes estruturais afetados, os mecanismos de deterioração, os respectivos sintomas e as sugestões para a reabilitação da estrutura afetada.

Quadro 6 – Componentes, Mecanismos, Sintomas e Sugestões para a Reabilitação da estrutura afetada.

COMPONENTE ESTRUTURAL AFETADO	MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO	SINTOMAS	SUGESTÕES PARA A REABILITAÇÃO
Pavimentação Asfáltica	Defeitos provocados pelo tráfego de veículos	Infiltração de água na estrutura da laje, desgaste superficial e formação de “panelas” (Figura 53)	Reparo da área degradada da laje e restauração do pavimento.
Tabuleiro (Face Inferior)	Ausência de Pingadeiras	Degradação do concreto, perda do cobrimento, armaduras aparentes e corroídas (Figura 49)	A parte deteriorada deve ser removida até profundidade necessária e limpa com ar comprimido ou jato de areia, depois é aplicado argamassa estrutural.
Guarda-corpos	Choques e Impactos Corrosão das Armaduras	Deterioração e perda de seção do aço; expansão, fissuração e lascamento do concreto (Figura 52)	Implantação de novos e restauração dos antigos.
Passeio	Choques e Impactos	Fissuração e lascamento do concreto e perda de armadura (Figura 52)	Reparo estrutural das armaduras oxidadas através dos procedimentos de apicoamento manual com remoção do concreto degradado e limpeza das superfícies, tratamento da ferragem que se encontra exposta e oxidada através da utilização de uma escova metálica ou jato de areia, selando-as, para posterior aplicação de uma camada de argamassa estrutural (EMMONS, 1994).
Vigas	Carbonatação	Redução progressiva do pH do concreto e despassivação do aço, abrindo caminho para a corrosão do aço (Figura 51)	Remoção do concreto, com limpeza e, às vezes, com substituição de armaduras e com recomposição das partes removidas (SOUZA; RIPPER, 1998).
	Ataque por Cloretos	Despassivação do aço, posteriormente, corrosão das armaduras (Figura 51)	Deve ser removida por processos simples, tais como: escovação com escova dura e seca, escovação com escova e água, leve jateamento d’água e leve jateamento de areia.
	Eflorescência	Consequência dos cloretos (Figuras 48 e 51)	
Encontro	Baixa resistência à Tração	Rachadura em grau avançado (Figura 47)	Deve ser corretamente investigado, se necessário um reforço estrutural.

5 CONCLUSÃO

A partir do embasamento teórico acerca das causas, mecanismos e sintomas de degradação do concreto e seguido das inspeções visuais nas três pontes analisadas foi possível identificar os possíveis agentes de deterioração em cada caso, descrevendo-se o estado de conservação, juntamente com as respectivas sugestões para a reabilitação da peça afetada.

As três obras de artes especiais inspecionadas visualmente e através da ampla documentação fotográfica apresentam diversas manifestações patológicas. A Ponte 01 apresentou o comprometimento da rigidez da estrutura, obstrução do sistema de drenagem, cristalização de sais nos poros do concreto, choques e impactos nos guarda-corpos, carbonatação, eflorescência e interrupção do funcionamento das juntas de dilatação.

A Ponte 03 apresentou os seguintes mecanismos de deterioração: ausência de pingadeiras no tabuleiro, defeitos na pavimentação asfáltica provocado pelo tráfego de veículos, choques e impactos nos guarda-corpos, carbonatação, ataque por cloretos, eflorescência e baixa resistência a tração no encontro. A Ponte 02, por sua vez, apresentou os mesmos agentes de deterioração da Ponte 03, além do comprometimento da rigidez da estrutura, possível reação álcali-agregado nos encontros e interrupção do funcionamento das juntas de dilatação.

A melhor alternativa para evitar as manifestações patológicas é a prevenção, mas não apenas por um correto projeto ou por uma execução dentro dos parâmetros de qualidade, mas por um eficiente programa de manutenção. Estes programas facilitam as verificações dos estados de deterioração estrutural, favorecendo a redução de custos das recuperações e evitando a formação acentuada e generalizada da patologia. Já as três obras de artes especiais inspecionadas apresentaram falta de conservação e diversas manifestações patológicas, oferecendo riscos à segurança da sociedade e evidenciando a ineficiência nos setores de projeto e manutenção dos órgãos públicos responsáveis por tais estruturas.

REFERÊNCIAS

ACI Committee 201. **ACI 201.2R-08 – Guide to Durable Concrete**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2008.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, Tibério. Tópicos sobre durabilidade do concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 753-792, 2005.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. Patologia das Estruturas. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 953-983, 2005.

AOKI, J.; MEDEIROS, G. **Retração: redução de efeito e compensação**. Área Técnica. No prelo.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, p. 488, 2011.

CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto**: Inspeção e técnicas eletroquímicas. Goiânia, 1997.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

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

CUNHA, Aurélio. A. **Estudo das patologias em obras de arte especiais do tipo ponte e viadutos estruturados em concreto**. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização),

Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de inspeções de pontes rodoviárias**. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2004.

_____. DNIT 090/2006 – ES: **Patologias do concreto – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2006.

EMMONS, Peter H. **Concrete repair and maintenance illustrated**. Inc. R.S. Means Company, Kingston, 1994.

FERNANDES, F; CARMINATTI Junior, R. **Análise da patologia da Igreja de São José de Taiaçu**. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Gestão em Avaliações e Perícias – Faculdade Unificada da Fundação Educacional de Barretos, Barretos, 2007.

FREITAS Jr, J. A. **Materiais de construção – Durabilidade do concreto**. Curitiba, 2008. 186 slides.

GASPAR, D. T. **Durabilidad del hórmingón; corrosión química; algunas consideraciones**. CEMCO 88. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, Seminário S. 1, p. 24. 1988.

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**. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, p. 905-944, 2010.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LIMA, R. B. S.; SILVA, A. S. R.; COSTA, F. N. **Reação álcali agregado e seus efeitos na construção de edifícios**. Monografia, Graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia da Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2009.

MAGALHÃES, A. G. **Durabilidade, proteção e recuperação das estruturas**. Notas de aula. (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, Paulo. **Migração de íons cloreto no concreto – influência da consistência água/cimento e consumo de cimento**. Revista: Ibracon, São Paulo, n. 32, p. 53-65, Fev./Mar./Abr., 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 211, 2002.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. M. P. **Ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, jan./mar. 2011.

MOTA, J. M. F.; BARBOSA, F. R.; COSTA E SILVA, A. J.; FRANCO, A. P. G.; CARVALHO, J. R. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, 2012, Maceió. *Anais...* Maceió, 2012.

NEPOMUCENO, Antônio A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 793-827, 2005.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland**. São Paulo: EPUSP, 2007. p. 59. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil; BT/PCC/452).

OLIVEIRA, A. M. **Fissuração, trincas e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Gestão em Avaliações e Perícias – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

OLIVEIRA, P. S. F.; TULA, L. **Tratamento anti-pó com endurecedores de superfície à base de flúor-silicatos metálicos**. Revista: PI – Pisos Industriais, São Paulo, Ano: 4, n. 5, p. 42-46, Set., 2006.

POLITO, Giuliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização

em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

SANTOS, M. R. G. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso.** Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SARTORTI, A. L. **Identificação de patologias em pontes de vias urbanas e rurais no município de Campinas-SP.** Dissertação (Mestrado) da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

TASCA, Maisson. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.