

Camila Mota Amado



**LIÇÕES DE MANUTENÇÃO CORRETIVA INEFICAZ E PROPOSTA DE
INTERVENÇÃO NAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO DAS PONTES
JUSCELINO KUBITSCHEK E PAULO BARRETO MENEZES**

Faculdade de Ciência e Tecnologia

Universidade Fernando Pessoa

Porto

2022

Camila Mota Amado



**LIÇÕES DE MANUTENÇÃO CORRETIVA INEFICAZ E PROPOSTA DE
INTERVENÇÃO NAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO DAS PONTES
JUSCELINO KUBITSCHEK E PAULO BARRETO MENEZES**

Faculdade de Ciência e Tecnologia

Universidade Fernando Pessoa

Porto

2022

Camila Mota Amado

**LIÇÕES DE MANUTENÇÃO CORRETIVA INEFICAZ E PROPOSTA DE
INTERVENÇÃO NAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO DAS PONTES
JUSCELINO KUBITSCHEK E PAULO BARRETO MENEZES**

Dissertação de mestrado a ser apresentada na
Universidade Fernando Pessoa, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Área de estudo: Reabilitação de estrutura.
Orientador: Prof. Doutor Elói João Faria Figueiredo.

LISTA DE ASSINATURA DO JURI

RESUMO

A durabilidade de estruturas especiais em betão armado em ambiente marítimo é desafiada permanentemente por um ambiente muito agressivo. Para além disso, a durabilidade pode ser, consideravelmente, reduzida em situações cuja construção nova ou a reabilitação de obras não são executadas de forma apropriada.

Esta dissertação trata de dois casos de estudo referentes a duas pontes em Aracaju (Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto) em que foram detectadas, depois da realização de uma inspeção visual, manifestações patológicas precoces pouco tempo após manutenção corretiva. Os serviços de manutenção corretiva em obras de arte especiais mostram-se muitas vezes inadequados pela falta de cultura de manutenção e prevenção, afetando a durabilidade do betão armado. As manifestações patológicas geralmente apresentadas são provocadas pelo ambiente marítimo agressivo, pelos materiais inadequados e pela ineficiência das soluções técnicas, gerando perda no seu desempenho estrutural.

Assim, o objetivo deste trabalho consiste na análise e na proposta de soluções de intervenção de manutenção nos dois casos de estudo, a partir do diagnóstico de manifestações patológicas precoces observadas após reparação, para apoiar uma nova manutenção corretiva e garantir durabilidade estrutural efetiva das duas pontes.

Este trabalho pretende contribuir com lições para os projetistas e as autoridades públicas, responsáveis pela manutenção das infraestruturas do estado de Sergipe, de forma melhorarem os procedimentos de manutenção corretiva, salvaguardado assim a integridade estrutural das pontes.

Palavras-chave: manifestação patológica, durabilidade e deterioração nas estruturas, ambientes agressivos marítimos, manutenção corretiva em obra de arte.

**CORRECTIVE MAINTENANCE INTERVENTION METHODS FOR DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF BRIDGES
JUSCELINO KUBITSCHKE E PAULO BARRETO MENEZES.**

ABSTRACT

The durability of special structures in marine environments is permanently challenged in a very aggressive environment. In particular, durability can be considerably reduced in situations where construction or rehabilitation works are not carried out properly. This dissertation deals with a case study of two special works of art in which, after performing a visual inspection, pathological manifestations were detected in a short period of time, after their corrective maintenance. Corrective maintenance services in special works of art are more aggravating due to the lack of maintenance and prevention culture, affecting the durability of reinforced concrete. The most worrying damages identified were reinforcement corrosion, leaching, efflorescence, infiltration spots, cracks and erosion in the crowning block. However, the pathological manifestations presented are caused by the aggressive maritime environment, inadequate materials, and their inefficient corrective maintenance, causing loss of structural performance. Thus, this article has as its main objective presenting and discussing the corrective maintenance project for the durability of structures, in aggressive maritime environments and to propose efficient measures to correct the current ones and prolong them, avoiding the appearance of new pathological manifestations in a shorter period than required. Finally, it is expected that the article will contribute with the designers and public agencies that are responsible for the maintenance of the state, with the purpose of assisting in the procedures, maintaining their structural integrity.

Keywords: Pathological manifestation, durability and deterioration in structures, aggressive marine environments, corrective maintenance in artwork.

AGRADECIMENTOS

A superação de metas consiste em um desafio diário e contamos com o apoio, a compreensão e amor de quem convivemos.

Toda honra e toda glória ao criador do universo, DEUS, sem Ele, seria impossível realizar esse sonho.

A minha vovó linda, que sempre me acalentou com suas belas palavras e incentivo.

Aos meus pais, que sonharam juntos comigo nessa caminhada, agradeço também a minha mãe por toda dedicação presente e exclusiva ao meu lado em Porto.

Ao meu orientador, por tanta atenção, paciência e ensinamentos, além de acreditar no meu potencial.

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos, amo vocês. A turma do mestrado, pela nossa união e carinho.

A todos que de alguma forma participaram para a realização desse trabalho e acreditaram no sucesso dessa pesquisa.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
AGRADECIMENTOS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	12
ÍNDICE DE TABELAS	14
NOTAÇÃO.....	15
SIGLAS	15
SÍMBOLOS	16
INTRODUÇÃO.....	17
Enquadramento e Motivação	17
Objetivos.....	18
Organização	18
1 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE: IDENTIFICAÇÃO E DETERIORAÇÃO DO BETÃO.....	20
1.1 Considerações Iniciais	20
1.2 Durabilidade do Betão em Ambiente Quimicamente Agressivo.....	20
1.3 Causas da Deterioração do Betão	22
1.3.1 Ações Químicas	23
1.3.2 Ações Biológicas	24
1.3.3 Ações Físicas	25
1.3.4 Ações Mecânicas	25
1.3.5 Falhas no Projeto, na Execução e na Manutenção.....	26
1.4 Levantamento Das Manifestações Patológicas Em Ambiente Marítimo Em Pontes.....	27
1.4.1 Ataque Por Sulfatos	31
1.4.2 Penetração Por Cloretos.....	35
1.4.3 Lixiviação e Eflorescência.....	40
1.4.4 Corrosão no Betão Armado	42
1.4.5 Erosão	46
1.4.6 Betão Desagregado	47
1.4.7 Fissuras	48
2 CASOS DE ESTUDO: DESCRIÇÃO E INSPEÇÃO VISUAL	52

2.1	Considerações Iniciais	52
2.2	Ponte Juscelino Kubitschek	53
2.2.1	Projetos e Elementos Geométricos	53
2.2.2	Métodos Construtivos.....	54
2.2.3	Materiais da Superestrutura e Mesoestrutura	55
2.2.4	Descrição dos Reparos Feitos.....	56
2.2.5	Levantamento das Manifestações Patológicas Precoces Após Reparos...	59
2.3	Ponte Paulo Barreto de Menezes	63
2.3.1	Projetos e Elementos Geométricos	63
2.3.2	Métodos Construtivos.....	63
2.3.3	Materiais	64
2.3.4	Levantamento das Manifestações Patológicas Precoces Após Reparos...	64
2.4	Proposta de Soluções de Intervenção Nas Duas Pontes	66
2.5	Considerações Finais	74
3	CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	76
3.1	Sumário e Conclusões.....	76
3.2	Desenvolvimentos Futuros	80
	BIBLIOGRAFIA	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Incidência dos principais danos estruturais de 100 pontes pesquisadas [9]....	23
Figura 2: Pedaco de betão de fundação de ponte deteriorado por íons de sulfato [19]..	32
Figura 3: Ponte afetada por ataque de sulfato [20].....	33
Figura 4: Pilar de uma ponte intensamente degradado por corrosão [25].	35
Figura 5: Tipos de corrosão de armadura [28].	37
Figura 6: Processo de penetração de íons cloretos no interior do betão armado [30]. ...	38
Figura 7: Aumento de risco de corrosão pelo ambiente contaminado em relação a umidade relativa [31].....	39
Figura 8: Corrosão de armaduras em pontes em zona de variação de maré [33].....	40
Figura 9: Pilar sobre o mar após 10 anos de construção, deteriorado devido aos efeitos de carbonatação com íons de cloretos [34].....	40
Figura 10: Presença de eflorescência [25].....	41
Figura 11: Perda de seção na barra de aço devido à corrosão eletroquímica.	42
Figura 12: Despassivação da armadura por cloretos [38].	43
Figura 13: Aumento do volume do aço, provocado pela corrosão [39].	44
Figura 15: Vista inferior da laje do tabuleiro, mostrando deslocamento do betão e corrosão da armadura [16].....	45
Figura 14: Viga principal em betão deslocado e corrosão de armaduras, da Ponte sobre o rio Várzea I, em Piauí [25].	45
Figura 16: Movimentos efetuados pela correnteza em torno dos pilares de uma ponte [40].	47
Figura 17: Erosão acentuada na fundação e no pilar da ponte da cidade de Sobral-Ceará [41].	47
Figura 18: Progresso das fissuras em um processo corrosivo [46].....	49
Figura 19: Fissuração da laje inferior da Ponte Érico Veríssimo [47].	50
Figura 20: Fissuração por retração hidráulica/térmica na Ponte Vicente da Fontoura [47].	51
Figura 21: Pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes [48].	52
Figura 22: Ponte da direita Juscelino Kubitschek, em direção a Orla e a esquerda, Ponte Paulo Barreto Menezes em direção ao centro de Aracaju [49].	53
Figura 23: Corte transversal esquemático da Ponte Juscelino Kubitschek [50].....	54
Figura 24: Corte longitudinal esquemático da Ponte Juscelino Kubitschek [50].....	54

Figura 25: Croqui esquemático da estrutura da Ponte Juscelino Kubitschek [50].	54
Figura 26: Superposição de armaduras no encontro da ponte Juscelino Kubitschek [50].	56
Figura 27: Superposição de armadura no pilar da ponte [50].	57
Figura 28: Tratamento das armaduras por proteção galvânica na viga longarina da ponte Juscelino Kubitschek [50].	57
Figura 29: Pilares e blocos de coroamento pintados com alcatrão, das Pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes [50].	58
Figura 30: Reparos para fissuras com tubos plásticos num das longarinas da ponte Paulo Barreto Menezes [50].	59
Figura 31: Corrosão com armaduras expostas, eflorescência e deslocamento de betão, na face inferior do tabuleiro da ponte Juscelino Kubitschek.	60
Figura 32: Falha na execução nos reparos da viga longarina e deslocamento de betão na Ponte Juscelino Kubitschek.	61
Figura 33: Fissuras no encontro do dente Gerber da Ponte Juscelino Kubitschek.	61
Figura 34: Fissuras na parte que faz a ligação da viga longarina com pilar na ponte Juscelino Kubitschek.	61
Figura 35: Fissura horizontal e mancha de eflorescência no pilar da mesoestrutura da ponte Juscelino Kubitschek.	62
Figura 36: Deslocamento e rachaduras no bloco de coroamento da Ponte Juscelino Kubitschek.	62
Figura 37: Pontos de corrosão e segregação de betão nas arestas do pilar da Ponte Juscelino Kubitschek.	62
Figura 38: Manchas de umidade na laje inferior da extremidade da ponte, por falha na drenagem pluvial no dreno.	64
Figura 39: Deslocamento da alvenaria, corrosão na armadura e oxidação no suporte da laje inferior da ciclovia.	65
Figura 40: Oxidação no suporte da laje em balanço, mancha de umidade pelo dreno, fissuras com início de corrosão.	65
Figura 41: Corrosão e fissuras nos pilares da infraestrutura.	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Fatores de degradação do betão [12].	26
Tabela 2. Patologia provenientes de defeitos de construção [16].	28
Tabela 3. Relação das 40 pontes inspecionadas [16].	29
Tabela 4. Ocorrência de manifestações patológicas na superestrutura das 40 pontes inspecionadas [16].	30
Tabela 5. Ocorrência de manifestações patológicas na mesoestrutura das 40 pontes inspecionadas [16].	30
Tabela 6. Ocorrência de manifestações patológicas na infraestrutura das 40 pontes [16].	31
Tabela 7. Fatores que influenciam no ataque químico do betão [21].	33
Tabela 8. Critérios de composição da norma nf p 18-317 para cimentos destinados as obras marítimas e em meios sulfáticos moderadamente agressivos [24].	34
Tabela 9. Proposta de intervenção para evitar deterioração precoce em função dos reparos efetuados nas pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes.	70

NOTAÇÃO

Todos os símbolos usados nesta dissertação são definidos quando aparecem no texto pela primeira vez. Para a conveniência do leitor, esta seção contém apenas os principais significados das siglas e símbolos comumente usados.

SIGLAS

NaCl	Cloreto de Sódio
MgCl ₂	Cloreto de Magnésio
MgSO ₄	Sulfato de Magnésio
CaSO ₄	Sulfato de Cálcio
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
KHCO ₃	Carbonato Ácido de Potássio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
CaSO ₄ . 2 H ₂ O	Reação dos sulfatos com hidróxido de cálcio
3CaO. Al ₂ O ₃ . 3CaSO ₄ . H ₂ O	Reação do gesso com os aluminatos
Ca (OH) ₂	Hidróxido de Cálcio
Na ⁺	Elemento Sódio
K ⁺	Elemento Potássio
Mg ²⁺	Elemento Magnésio
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
Kg	Kilograma
Cl ⁻	Cloro
γ-Fe ₂ O ₃	Óxidos de Ferro
OH ⁻	Hidroxila
Ph	Solução aquosa ou acidez
a/c	Água e cimento
CA 50	Aço – Carbono
Ca (NO ₃) ₂	Nitrato de Cálcio
CP-IV	Cimento Portland resistente a sulfatos

FRP	Fibra de Carbono Reforçada
CML	Betão Modificado com Látex
VMA	Viscosidade e Anti-Washout

SÍMBOLOS

Mm	Milímetro
M ³	Metros Cúbicos
Kg	Quilograma
Cm	Centímetro
Mm	Micrômetro
Kg/m ³	Quilograma por Metro Cúbico
Fck	Resistência do Betão à Compressão
MPa	Mega Pascal

INTRODUÇÃO

Enquadramento e Motivação

As manifestações patológicas apresentam-se com uma ou diversas formas de deterioração do betão armado, comprometendo o aspecto estético e a segurança das estruturas, podendo levar ao colapso parcial ou total das mesmas. No entanto, sob ações de serviço, é necessário assegurar um programa de manutenção para garantir bom desempenho e durabilidade estrutural. As pontes e viadutos são obras de arte especiais que estão susceptíveis a diversas patologias, em função do seu uso contínuo e da falta de programas preventivos de manutenção adequados em grande parte dos casos [1].

Entende-se por manutenção todos os procedimentos necessários para garantir o desempenho estrutural satisfatório ao longo do tempo, ou seja, são rotinas que possuem o objetivo de proporcionar à estrutura um maior tempo de vida útil [2].

As estruturas podem ser funcionalmente deficientes mesmo depois de uma manutenção corretiva, apresentando as mesmas manifestações patológicas antes do prazo estimado para a próxima manutenção. Porém, na manutenção corretiva é necessário a realização de um projeto de intervenção, com uma metodologia de abordagem diferente e específica em cada manifestação patológica apresentada, com sistemas de proteção e reparos estruturais, com o propósito de preservar a durabilidade.

Note-se que, muitas vezes as manutenções de pontes são desprezadas, sob a justificativa dos elevados custos, ou apenas ocorre quando se manifesta possível colapso estrutural, afetando as condições de funcionamento e segurança estrutural, além da estética. O grande problema é a falta de cultura de manutenção, as empresas focam na execução e esquecem de manter a atenção pós-obra com as manutenções necessárias, quanto mais tempo passa, mais progride a deterioração, exigindo uma quantia maior de custos, podendo ser evitado quando apresentasse pequenas avarias, mas o que acontece é

que, as manifestações patológicas evoluem ao ponto de levar o elemento as condições últimas de segurança estrutural, e muitas vezes dos usuários.

Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste na obtenção de lições e na proposta de soluções de intervenção de manutenção, a partir do diagnóstico de manifestações patológicas em pontes construídas em ambiente marítimo, para apoiar o processo de manutenção corretiva. Para isso, são utilizados dois casos de estudos de duas pontes, cujas intervenções de manutenção ou de reparos se revelaram inadequadas pouco tempo após a intervenção.

Organização

Esta dissertação está organizada em quatro capítulos sequenciais. Neste primeiro capítulo destaca-se o processo de degradação das estruturas de betão armado em pontes, possivelmente ocasionados por inadequados métodos na manutenção corretiva, e faz-se uma introdução, constando o enquadramento do tema, a motivação e os objetivos.

No segundo capítulo identificam-se as manifestações patológicas mais frequentes que ocorrem em pontes de betão armado em ambiente marítimo, bem como a durabilidade do betão e as principais causas de deterioração.

O terceiro capítulo refere-se a dois casos de estudo, nomeadamente de duas pontes.

– Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes –, que passaram por manutenção corretiva e num curto espaço de tempo surgiram novamente manifestações patológicas. Assim, são abordados neste capítulo as descrições de técnicas dos reparos e reforços das estruturas de betão armado, executados na manutenção corretiva. Em

seguida, é apresentada uma proposta de intervenção baseada em fundamentos técnicos, com a finalidade de prolongar a durabilidade das estruturas de betão armado, após uma manutenção corretiva.

No quarto capítulo apresentam-se as principais conclusões e alguns desenvolvimentos futuros deste trabalho.

1 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE: IDENTIFICAÇÃO E DETERIORAÇÃO DO BETÃO

1.1 Considerações Iniciais

A deterioração estrutural do betão consiste na conjugação de fatores como agressividade ambiental, má qualidade das estruturas causada pela concepção de projetos e materiais, e falta de manutenção preventiva ou sua ineficiência.

Quando não são realizadas intervenções de manutenção preventiva, o desempenho das estruturas é afetado e, conseqüentemente, as manifestações patológicas que poderiam ser evitadas ficam mais evidenciadas diminuindo sua vida útil até chegar à ruptura.

1.2 Durabilidade do Betão em Ambiente Quimicamente Agressivo

A questão da durabilidade do betão deve ser considerada de forma holística e sistêmica, envolvendo parâmetros interligados em uma visão global que tenha em conta as partes de toda estrutura para o funcionamento de um todo sistema. Existem pontos a serem analisados cuidadosamente desde a etapa de seu planeamento até sua utilização: concepção do projeto, planeamento, escolhas dos materiais e componentes, execução, cura do betão, a influência do meio ambiente sobre o betão e seus mecanismos, além das atividades de inspeção e manutenção.

A definição sobre durabilidade abrange opiniões diversas. Segundo [3], a durabilidade é um conceito complexo e amplo, que necessita de ser bem definido e delimitado em relação ao contexto em questão. Em [4], afirma-se que nenhum material é, por si, durável ou não durável, aduzindo que a correlação entre as propriedades do material, a agressividade ao ambiente e a magnitude dos esforços atuantes é que vai determinar a taxa de degradação e, conseqüentemente, a vida útil do material. Novamente

a referência [3], confirma com mais clareza que a durabilidade é a capacidade de um material de manter o seu bom comportamento e desempenho em condições de segurança, sob as condições previstas de serviço, durante o tempo previsto de duração.

O betão, assim como qualquer outro material, sofre processo natural de envelhecimento que deve ser observado na fase do seu planeamento. Mas, o que por muitas vezes ocorre, é a deterioração precoce do betão originário de uma má avaliação da agressividade da ação do meio ambiente, deficiência, má qualidade do material, e má execução, além da falta periódica de manutenção.

A ação de um ambiente agressivo sobre a estrutura do betão pode ser definida pelas condições climáticas como o macroclima e o microclima local, que define temperatura, umidade, poluentes, chuvas ácidas e presença de substâncias agressivas como cloretos e sulfatos contidos na água do mar. São reações físicas e químicas, cujos efeitos não são muitas vezes considerados no planeamento do projeto, afetando a durabilidade do betão.

A umidade relativa, a periodicidade das chuvas, a orientação dos ventos, a temperatura e as substâncias que estão presentes nesse meio, destacam-se quanto a sua importância na interação com o betão armado. Várias são as pesquisas que buscam investigar os efeitos do meio ambiente sobre o betão, contudo ainda faltam parâmetros seguros que sinalizem para uma produção de concretos duráveis [6].

O betão quando úmido mostra-se susceptível ao ingresso de agentes agressivos, pois tem tendência a absorver muita água e, sendo o processo de secagem muito lento, cria-se um microambiente agressivo. Quando as águas provenientes de chuvas, ou de outro meio, permanecem confinadas no elemento estrutural, e estas estão contaminadas por agentes agressivos, como íons cloreto e sulfato, tendem com o tempo, a levar à despassivação da armadura e à deterioração precoce do betão [7].

As alterações de ordem química, provocadas pelas substâncias presentes na água do mar no betão, são consideravelmente agravadas pelas ações físicas, ações de variação do nível das marés e a dissipação da energia cinética das ondas sobre a estrutura [8].

Segundo a NBR 6118 [9], existem classes de agressividade ambiental, portanto, são determinadas especificações diferenciadas na elaboração do betão e seus componentes. A estrutura do betão torna-se mais vulnerável adquirindo as manifestações patológicas quando localizada na água do mar ou na região litoral.

Enfatizando ainda, a importância de um betão de baixa permeabilidade, com adoção de relação água/cimento baixa, adensamento e cura adequada, e escolhas de materiais cimentícios apropriados ao ambiente agressivo, como possibilidades de diminuir a deterioração do betão.

1.3 Causas da Deterioração do Betão

Tal como mostra na Figura 1, a deterioração do betão é iniciada a partir da ligação entre os materiais e suas propriedades, com a agressividade do meio ambiente, reagindo mais severamente com a pasta do cimento em relação ao agregado. O processo de degradação modifica a função do seu desempenho de forma correta, muitas vezes nem sempre se manifestando visualmente, resultando em uma combinação de diferentes fatores internos e externos. Ocorrem manifestações de acordo com mecanismo em grupos diferentes como: químicos, biológicas, físicos, mecânicas e falhas na execução e manutenção.

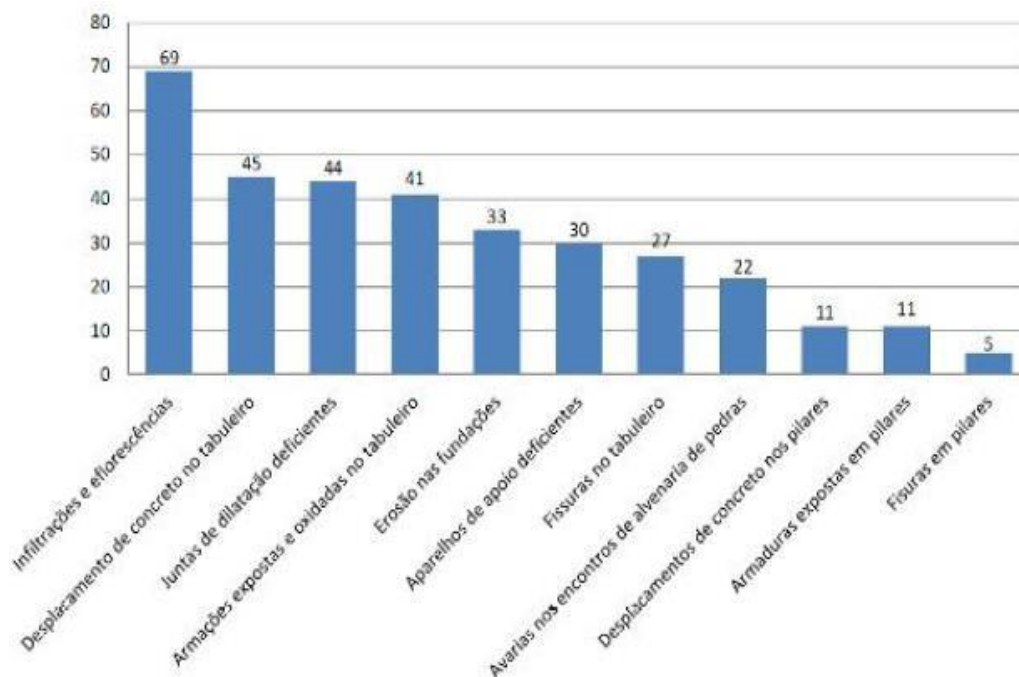


Figura 1: Incidência dos principais danos estruturais de 100 pontes pesquisadas [9].

1.3.1 Ações Químicas

Em todas as reações de degradação do betão, a água no estado gasoso ou líquido é o fator mais importante sendo o veículo dos íons agressivos que reage com a pasta do cimento. O ataque químico ao betão ocorre, necessariamente, por dois mecanismos interligados: permeação e difusão. A água do mar possui diversos sais dissolvidos, com concentração em torno de 3,5% de sais solúveis, contendo cloretos de sódio e magnésio, em forma de cristal ou gotículas de água salgada, dos ácidos e sulfatos, dióxido de carbono, oxigênio dissolvidos e ação dos sais a base de cloretos. Os principais sais que compõem a água do mar são: Cloreto de sódio (NaCl), cloreto de magnésio (MgCl₂), sulfato de magnésio (MgSO₄), sulfato de cálcio (CaSO₄), cloreto de cálcio (CaCl₂), carbonato ácido de potássio (KHCO₃).

A região nordeste do Brasil é uma área altamente prejudicial sobre a durabilidade do betão, devido à sua alta agressividade ambiental ocasionada por condições climáticas, como temperatura elevada, sendo um fator de aceleração das reações químicas, umidade

elevada relativa do ar, direção e intensidade dos ventos, vaporização da água do mar, poluição do ar, composição da água do mar, que varia amplamente de oceano, e a importância na elaboração de um betão que seja susceptível ao ataque químico.

Quando ocorre o período de molhagem e secagem do betão pela água do mar, os sais dissolvidos são deixados em forma de cristais, reidratando e aumentando de tamanho quando molhado de imediato, exercendo uma força de expansão sobre a pasta de cimento. Não somente ocorrem pelo fato de molhagem e secagem, mas também por respingos direto da água do mar, ou quando os sais são transportados pelo ar, depositados na superfície do betão. O ataque químico pode alcançar uma profundidade de alguns milímetros, removendo a pasta de cimento endurecida e alguns agregados miúdos, sobrando apenas partículas de agregados graúdos.

1.3.2 Ações Biológicas

A presença de sulfeto de hidrogênio formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), em redes de esgoto, dão origem a ataque ao betão pela presença de numerosos compostos sulfurados em forma orgânica ou inorgânica, que são transportados pelas águas do esgoto com quantidades suficientes de bactérias, especialmente as sulfato redutoras. Existem dois tipos de bactérias, anaeróbicas e aeróbicas, que entram em processo, utilizando hidrogênio sulfurado em seu metabolismo, liberando o ácido sulfúrico (H_2SO_4), altamente agressivo ao betão. Quando o meio contém quantidades suficientes de oxigênio, os sulfetos pelas bactérias serão oxidados e mantidos, sem a formação de sulfeto de hidrogênio. Mas quando o meio for pobre em oxigênio, as bactérias não serão totalmente oxidadas. Com o aumento da concentração de sulfetos solúveis, ocorre a liberação do sulfeto de hidrogênio gasoso.

1.3.3 Ações Físicas

O efeito de degradação de uma estrutura de betão devido as ações físicas sofrem desgastes ocasionados principalmente pela temperatura e umidade. A temperatura é um fator que influencia na penetração de cloretos no betão; segundo [10], na maioria dos processos de natureza química, a temperatura age aumentando sua cinética. Tal fato explica a razão pela qual, estruturas localizadas nas regiões quentes deterioram mais rapidamente do que estruturas inseridas nas regiões frias e temperadas.

A umidade relativa do ambiente pode ser relacionada diretamente com a quantidade de água no interior do betão, desde que o mesmo não esteja saturado [11]. A água nos poros do betão influencia totalmente a difusão dos gases e íons do betão.

Além da temperatura e umidade, os efeitos de cristalização de sais nos poros ocorrem devido a evaporação de água e depósito de sais nos poros, causando anomalias nas estruturas pelas pressões produzidas pela cristalização de sais, a partir de soluções supersaturadas. Os desgastes superficiais são adquiridos pela ação de abrasão e erosão.

1.3.4 Ações Mecânicas

As causas desse tipo de deterioração são geralmente associadas a situações mecânicas sem previsão, como choque de veículos impactados nas estruturas de betão, guardas corpos, guarda-rodas de viadutos, recalque de fundações e solicitações imprevisíveis como incêndio, inundações, sismos e ventos fortes.

Esse tipo de ação afeta parcialmente ou totalmente a estrutura do betão. Ao depender do fato ocorrido, pode gerar uma diminuição na resistência da estrutura, facilitando a entrada de agentes agressivos, principalmente quando o betão e a armadura ficam expostos, ou até a ruptura da mesma.

A Tabela 1 resume e descreve os fatores de degradação do betão e seus efeitos nas estruturas.

Tabela 1. Fatores de degradação do betão [12].

Fator de Degradação	Processo	Degradação
Mecânicos		
Carregamento estático	Deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento cíclico	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento por impacto	Fadiga	Vibração, deflexão, fendilhação, rotura
Físicos		
Variação de temperatura	Expansão/Contração	Deformação restringida
Variação de umidade	Retração e expansão	Deformação restringida
Baixa temperatura + água	Formação de gelo	Desagregação do betão
Sal descongelante + geada	Transferência de calor	Destacamento do betão
Gelo (mar)	Abrasão	Destacamento, fendilhação
Trânsito	Abrasão	Desgaste e rotura
Água corrente	Erosão	Danos superficiais
Água turbulenta	Cavitação	Cavidades
Biológicos		
Micro-organismos	Produção de ácido	Lixiviação
Bactéria	Produção de ácido	Lixiviação
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 da camada de passivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço + H ₂ O + O ₂	Corrosão	Expansão do aço, perda de σ e de aderência
Tensão + Cloretos	Corrosão do aço	Rotura dos tendões de pré-esforço
Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
Agregado (sílica) + Álcalis	Reação da sílica	Expansão, desagregação
Agregado (carbonato) + Álcalis	Reação do carbonato	Expansão, desagregação

1.3.5 Falhas no Projeto, na Execução e na Manutenção

Os problemas de deterioração das estruturas e de seus materiais componentes decorrem, em grande parte, de um projeto inadequado e de uma execução mal cuidada. Constata-se que as deficiências são comuns, provocando a ocorrência de falhas que

resultam na necessidade de reforço ou recuperação, ou até em casos extremos de demolição [13].

Desta maneira, a maioria das manifestações patológicas poderiam ser evitadas caso houvesse um melhor detalhamento de projeto, escolha apropriada dos materiais e correta execução, assim como, uma maior preocupação com a realização de intervenções de manutenção nos elementos das edificações [14].

Os problemas socioeconômicos do Brasil afetam a mão de obra não qualificada, provocando uma baixa qualidade técnica dos trabalhadores, podendo ocorrer falhas na execução, prejudicando o processo de construção com qualidade, tal como mostra na Tabela 2.

A falta de planejamentos de manutenção na construção civil é uma das principais causas de deterioração das estruturas, considerado pela falta de conhecimento técnico e na incompetência política.

Uma das formas de detectar e evitar o agravamento das patologias presentes nas estruturas, é através de inspeção estrutural periódica para monitoramento das patologias. Com isso, cria-se a possibilidade de proporcionar maneiras de garantir maior vida útil e resistência à degradação da estrutura, além de ser uma forma de economizar recursos com a prevenção [15].

1.4 Levantamento Das Manifestações Patológicas Em Ambiente Marítimo Em Pontes

A Tabela 3 identifica um levantamento de inspeção em 40 pontes brasileiras construídas em cidades de área marítima, com informações básicas sobre suas geometrias, tipologia, idade e localização nas rodovias. As Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os danos estruturais mais significativos observados, identificando as quantidades e os

percentuais de obra em que cada dano foi observado, separadamente na superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura, determinando a situação existente das manifestações patológicas mais frequentes das pontes vistoriadas após 40 anos de construção [16].

Tabela 2. Patologia provenientes de defeitos de construção [16].

Elementos	Origem	Consequência	Patologias
Cofragem	• Restos de cofragem após a obra estar finalizada	• Putrefação • Corrosão	• Deterioração do betão
	• Não estanque	• Perda de calda de cimento • Segregação	• Ninho de inertes • Penetração de água
	• Deficiente/ demasiada flexível	• Perda de resistência	• Fissuração
	• Remoção prematura	• Deformação estrutural (flechas excessivas e deslocamentos)	• Fissuração • Ninho de vazios
Escoramentos	• Remoção prematura • Mal dimensionados ou mal fundados	• Deformação estrutural (flechas excessivas e deslocamentos)	• Fissuração
Armaduras	• Má conservação em obras	• Perda de resistência	• Oxidação
	• Má disposição	• Recobrimento insuficiente • Perda de resistência • Ninho de vazios	• Início de corrosão • Fissuração • Descasque do betão • Carbonatação
Betão	• Inadequada vibração	• Segregação • Concentração de água • Sedimentação • Perda de resistência	• Ninho de inertes • Descasque • Retração • Fissuração
	• Má cura	• Secagem rápida	• Fissuração
	• Má qualidade • Má execução em obras • Recobrimento insuficiente	• Penetração de agentes agressivos através de água e do ar	• Rotura da passivação das armaduras • Início da corrosão
Pré-esforço	• Montagem incorreta	• Deformação estrutural	• Fissuração
Junta de dilatação	• Montagem incorreta	• Impossibilidade de movimentos relativos • Infiltração de águas	• Fissuração • Destruição da camada de transição • Oxidação dos elementos metálicos • Danificação (junta dilatação)
Aparelhos de apoio	• Montagem incorreta	• Deficiente funcionalmente	• Fissuração • Degradação
			• Rutura
Impermeabilização e rede de drenagem	• Montagem incorreta	• Escorrências • Umidades • Eflorescências	• Deterioração do betão • Corrosão

Tabela 3. Relação das 40 pontes inspecionadas [16].

OAE N°	ROD.	Descrição / Localização	Extensão m	Largura m	Fundação	Tabuleiro	Idade
01	BR101/PE	Ponte sobre o rio Cap. Mirim – km4,60	45,10	8,35	estacas	grelha	50
02	BR101/PE	Ponte sobre o Canal de Goiana – km5,60	91,00	8,35	estacas	grelha	50
03	BR101/PE	Ponte sobre o rio Tracunhaem – km8,50	54,00	8,35	estacas	grelha	50
04	BR101/PE	Ponte sobre o rio Arataca – km24,30	54,00	8,35	estacas	grelha	50
05	BR101/PE	Ponte sobre o rio Botafogo – km33,40	40,30	8,20	estacas	grelha	50
06	BR101/PE	Ponte sobre o rio Tabatinga – km39,27	8,10	8,20	diretas	laje	50
07	BR101/PE	Ponte sobre o rio Igarassu – km41,70	26,90	8,35	diretas	grelha	50
08	BR101/PE	Ponte sobre o rio Desterro – km47,40	9,00	8,30	diretas	laje	40
09	BR101/PE	Viaduto sobre RFFSA – km110,50	17,80	8,40	diretas	grelha	40
10	BR101/BA	Ponte sobre o rio Pojuca – km153,62	80,00	13,00	estacas	grelha	40
11	BR101/BA	Viaduto sobre RFFSA – km215,70	20,00	9,90	diretas	grelha	40
12	BR101/BA	Ponte sobre o rio Preto – km347,70	105,00	10,00	diretas	grelha	50
13	BR101/BA	Ponte sobre o rio Burundanga – km508,00	14,80	10,00	diretas	grelha	40
14	BR101/BA	Ponte sobre o rio Malhada – km523,00	15,00	10,00	diretas	grelha	40
15	BR101/BA	Ponte sobre o rio Barra da Viasa – km545,00	6,00	10,00	diretas	laje	40
16	BR101/BA	Ponte sobre o rio Jucuruai Norte – km812,00	315,80	10,00	estacas	grelha	40
17	BR116/BA	Ponte sobre o rio Dois Lúndes – km366,00	31,50	8,35	diretas	laje	45
18	BR116/BA	Ponte sobre o rio Pojuca – km420,40	26,60	11,00	diretas	grelha	45
19	BR116/BA	Ponte sobre o rio Aguiadas – km453,50	28,80	8,80	diretas	grelha	45
20	BR116/BA	Ponte sobre o rio Cavaco – km456,90	41,20	7,60	estacas	pórtico	50
21	BR116/BA	Ponte sobre o rio Curamatá – km472,00	41,20	7,60	diretas	pórtico	50
22	BR116/BA	Ponte sobre o rio Paratigi – km496,80	91,00	9,30	tubulão	grelha	45
23	BR116/BA	Ponte sobre o Riacho Grande 1 – km578,00	6,00	13,60	diretas	laje	45
24	BR116/BA	Ponte sobre o rio Ribeirão – km680,60	34,00	10,80	diretas	grelha	45
25	BR116/BA	Ponte sobre o rio Santa Rosa 1 – km680,60	5,80	12,00	diretas	grelha	50
26	BR116/BA	Ponte sobre o rio Santa Rosa 2 – km680,80	6,05	12,20	diretas	grelha	50
27	BR116/BA	Ponte sobre o rio Santa Rosa 5 – km686,60	9,90	11,15	diretas	grelha	50
28	BR116/BA	Ponte sobre o rio Jibóia – km726,00	41,40	8,20	diretas	grelha	45
29	BR116/BA	Ponte sobre o rio Pavão – km798,40	10,40	10,45	diretas	grelha	45
30	BR116/CE	Ponte sobre o rio Porcos – km488,30	84,60	8,20	tubulão	grelha	40
31	BR116/CE	Ponte sobre o rio Tamanduá – km500,53	26,20	8,20	diretas	grelha	40
32	BR324/BA	Ponte sobre o rio Camisõesinho – km415,00	28,60	10,00	diretas	grelha	40
33	BR324/BA	Ponte sobre o rio do Peixe – km470,00	43,00	10,00	diretas	laje	45
34	BR324/BA	Viaduto São Sebastião – km576,00	71,00	13,10	estacas	chular	40
35	BR324/BA	Viaduto Porto Aratu – km612,00	55,00	13,10	estacas	pórtico	40
36	BR343/PI	Ponte sobre o rio Jacarei – km121,10	30,40	8,20	diretas	grelha	40
37	BR343/PI	Ponte sobre o rio Titara – km244,30	26,40	11,10	diretas	grelha	40
38	BR343/PI	Ponte sobre o rio Raposo – km294,50	16,60	10,10	diretas	grelha	40
39	BR428/PE	Ponte sobre o rio Trairas – km1,70	181,60	8,30	diretas	grelha	35
40	BR428/PE	Ponte sobre o rio Brigida – km44,60	340,00	10,00	diretas	celular	35

Tabela 4. Ocorrência de manifestações patológicas na superestrutura das 40 pontes inspecionadas [16].

Tipo de dano	Quantidade De Obras	%
Deslocamento do concreto das vigas principais	31	77,5
Deslocamento do concreto das lajes do tabuleiro	35	87,5
Deslocamento do concreto das transversinas	25	62,5
Fissuras nas vigas principais	21	52,5
Fissuras nas lajes do tabuleiro	15	37,5
Fissuras nas transversinas	10	25,0
Oxidação de armaduras das vigas principais	31	77,5
Oxidação de armaduras das lajes do tabuleiro	25	62,5
Oxidação de armaduras das transversinas	7	17,5
Deformação nas vigas principais	5	12,5
Deformações nas lajes	8	20,0
Fissuras e/ou esmagamento de dente Gerber	1	2,5
Carbonatação	15	37,5
Esflorescências	15	37,5

Tabela 5. Ocorrência de manifestações patológicas na mesoestrutura das 40 pontes inspecionadas [16].

Tipo de dano	Quantidade De Obras	%
Deslocamento do concreto de pilares e/ou encontros	22	55,0
Lixiviação do concreto de pilares e/ou encontros	15	37,5
Deformações em pilares e/ou encontros	5	12,5
Fissuras em pilares e/ou encontros	25	62,5
Oxidação de armaduras de pilares e/ou encontros	22	55,0
Deformações e/ou travamento de aparelhos de apoio	30	75,0
Carbonatação	10	25,0
Eflorescências	10	25,0
Infiltrações causadas por deficiências de drenagem dos encontros	15	37,5

Tabela 6. Ocorrência de manifestações patológicas na infraestrutura das 40 pontes [16].

Tipo de dano	Quantidade De Obras	%
Erosão nas fundações de encontros e pilares	18	45,0
Descalçamento das fundações de encontros e pilares	6	15,0
Recalque de fundações de encontros e pilares	5	12,5
Exposição e desconfinamento de estacas	4	10,0
Deterioração do concreto de sapatas, blocos de estacas ou tubulões	10	25,0
Oxidação das armaduras de sapatas, blocos de estacas e cintas	10	25,0
Deterioração de concreto e oxidação de armaduras nos fustes de tubulões	2	5,0
Erosão nos aterros dos encontros	10	25,0

1.4.1 Ataque Por Sulfatos

A ação do ataque de sulfatos no betão abrange certo número de fenômenos físico-químicos que dependem de um conjunto de fatores que geram a deterioração, pelos tipos de sulfatos, de cimento, formulação do betão e classe de exposição, que podem conduzir as reações com aumento de porosidade, expansão, fissuração e desagregação do betão. A velocidade da reação depende da quantidade das substâncias agressivas, da permeabilidade do betão, tipo do cimento e dos componentes reativos e da quantidade de água disponível.

As consequências por ataque de sulfatos não compreendem somente a desagregação por expansão e fissuração, mas também a perda de resistência do betão devido à perda de coesão na pasta de cimento, e à perda de aderência entre a pasta e as partículas dos agregados [10].

Os sulfatos são encontrados na água do mar, no solo, nas águas industriais e nos esgotos, ocorrendo geralmente em três fases na estrutura do betão:

- Penetração dos íons sulfato na matriz do cimento;

- Reação dos sulfatos com hidróxido de cálcio, formando gesso ou gipsita, ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- Reação do gesso com os aluminatos, resultando em compostos expansivos, como a etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Segundo [18], os componentes da pasta de cimento mais vulneráveis ao ataque de íons de sulfato é o hidróxido de cálcio e as fases que contém alumina. O mecanismo ocorre na presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no contato da pasta com íon de sulfato, assim os hidratos que contém alumina são convertidos de mono sulfato hidratado em etringita. Dependendo do cátion presente na solução de sulfato (Na^+ , K^+ ou Mg^{2+}), tanto o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como o C-S-H podem ser convertidos em gipsita.

O betão, quando atacado por sulfatos, possui um aspecto esbranquiçado, conhecido como eflorescência (Figura 2 e Figura 3). A deterioração geralmente começa nos cantos e arestas seguida de uma fissuração progressiva e lascamento, que reduzem o betão a uma condição friável ou menos mole [10].



Figura 2: Pedação de betão de fundação de ponte deteriorado por íons de sulfato [19].



Figura 3: Ponte afetada por ataque de sulfato [20].

Tabela 7. Fatores que influenciam no ataque químico do betão [21].

Fatores que aceleram ou agravam o ataque	Fatores que mitigam ou atrasam o ataque
1. Alta porosidade devido a: <ul style="list-style-type: none"> • Alta absorção de água; • Permeabilidade; • Vazios. 	1. Concreto denso obtido pela: <ul style="list-style-type: none"> • Proporção adequada na mistura; • Redução do teor de água na mistura; • Aumento de material cimentício; • Introdução de ar; • Adequado processo de adensamento; • Cura eficaz.
2. Fissuras devido a: <ul style="list-style-type: none"> • Concentração de tensões; • Choques térmicos. 	2. Redução da tensão de tração no concreto obtida pela: <ul style="list-style-type: none"> • Utilização adequada reforço à tração e posicionamento adequado; • Inclusão de pozolana (para reduzir o aumento de temperatura); • Utilização adequada de juntas de contração.
3. Lixiviação e penetração de líquidos devido a: <ul style="list-style-type: none"> • Passagem de líquidos; • Empoçamento; • Pressão hidráulica. 	3. Design estrutural: <ul style="list-style-type: none"> • Para minimizar a área de contato e turbulência; • Utilização de membranas e sistemas de barreiras protetoras para reduzir a penetração.

Segundo [22], a reação mais perigosa deste tipo de ataque está ligada à formação de etringita, a qual ocasiona maiores efeitos expansivos. No global, existem parâmetros que influenciam a agressividade ao betão (Tabela 7), como as condições de exposição, a permeabilidade do betão, devido aos transportes de íons, as características do cimento e suas adições, assim como o processo de produção do betão, seus agregados, dosagem, cura e temperatura.

A ABNT NBR 12655/2015 [23] determina requisitos para betão exposto a ambientes com ataque por sulfatos. A NF P 15-317 [24] determina os cimentos destinados a obras marítimas em meios sulfáticos moderadamente agressivos (Tabela 8).

Tabela 8. Critérios de composição da norma nf p 18-317 para cimentos destinados as obras marítimas e em meios sulfáticos moderadamente agressivos [24].

Cimento	Adição	C ₃ A	SO ₃	%C ₃ A + 0,27 %C ₃ S
CEM I	-	≤ 10 %	≤ 3% se C ₃ A ≤ 8% ≤ 2,5% se 8% ≤ C ₃ A ≤ 10%	23,5% / cimento
CEM II/A-S	≤ 13 %	≤ 11,5 % / clínquer	≤ 3% /cimento	-
CEM II/A-V	≥ 13 %	≤ 10 % / cimento		
CEM II/A-D				
CEM II/A-P	≤ 20 %	≤ 10 % / clínquer	≤ 3% /cimento	≤ 26% / clínquer se P ≥ 10 % ≤ 23,5% / clínquer se P ≤ 10%
CEM II/A-L	≤ 20 %	≤ 10 % / clínquer	≤ 3% si C ₃ A _{clínquer} ≤ 8% ≤ 2,5% se 8 ≤ C ₃ A _{clínquer} ≤ 10%	≤ 23,5% / cimento
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Limitação de íons sulfeto S ²⁻ ≤ 2% / cimento			
CEM V/A CEM V/B	Limitação de íons sulfeto S ²⁻ ≤ 2% / cimento			
	CaO ≤ 50% /cimento			

S = escória de alto forno, V = cinzas volantes, D = sílica ativa, P = pozolanas, L = calcário.

As características do betão deve conter baixa permeabilidade, diminuindo a relação água/cimento e a utilização de cimentos pozolânicos ou escórias, que são mais resistentes ao ataque por sulfato por apresentarem baixo teor de C₃A (Aluminato

tricálcico) e C4AF (Ferro aluminato tetracálcico), liberando pouco Ca(OH)_2 durante a hidratação, reduzindo a velocidade de penetração. O betão, quando fissura, aumenta a sua permeabilidade e facilita a penetração, com consequências ao nível da aceleração do processo de deterioração e redução da resistência (Figura 4).



Figura 4: Pilar de uma ponte intensamente degradado por corrosão [25].

1.4.2 Penetração Por Cloretos

A presença de íons cloreto nas estruturas de betão é uma das principais causas de corrosão nas armaduras, podendo estar presentes nos tipos de agregados contaminados, água do mar, águas freáticas salobras, aditivos aceleradores de pega e endurecimentos que possuam CaCl_2 .

O ataque por cloretos é de origem externa, penetrando no betão através da difusão dos íons na água e por absorção. Os principais mecanismos são:

- Absorção capilar: Presentes principalmente em áreas de respingos e maré, em zona litorânea, quando ocorre o ciclo de umedecimento e secagem. Os cristais presentes nos poros, após a evaporação, podem ser levados ao interior do betão;

- Difusão: Ocorre com a concentração de dois diferentes meios aquosos, o líquido e o gás; a penetração ocorre devido a movimentação dos íons de um meio de elevada concentração para o de menor;
- Migração de íons: Os íons movimentam-se a partir de uma corrente elétrica, entre duas partes da estrutura, por uma mínima diferença de potencial, causadas por correntes de fuga.

Segundo [26], a penetração de cloretos é orientada pelas leis de difusão (Leis de Fick). Já segundo [27], existe a teoria do filme do óxido, a teoria da adsorção, a teoria do complexo transitório, porém não existe nenhuma efetivamente consolidada. A referência [27] afirma que para dosagens, o teor limite de cloreto para ruptura do filme passivador pode variar entre 0,6 e 0,9 kg de Cl⁻ por metro cúbico de betão.

Entre os estudos relacionados com a durabilidade das estruturas de betão armado, verifica-se que a corrosão das armaduras provocadas pela ação dos íons de cloretos é um dos problemas mais sérios que pode ocorrer nas estruturas [28].

Os íons cloreto podem atingir grandes profundidades no interior do betão, sendo capaz inclusive de causar a corrosão do aço dentro do elemento, e podem ser consideravelmente influenciados nesse sentido, se o betão estiver sujeito a condições de molhagem e secagem [29].

A camada passivadora protetora sobre a superfície do aço dentro do betão é rapidamente formada após a hidratação do cimento, que consiste γ -Fe₂O₃, fixo ao aço. Os íons cloretos destroem o filme, que fica protegido quando o óxido estiver presente, mas na presença de água e oxigênio, ocorre a corrosão, pela perda da camada protetora.

A corrosão inicia-se quando existe uma diferença de potencial elétrico ao longo do aço no betão, ocorrendo uma reação química, formando duas regiões: anódica e catódica, ligadas pelo eletrólito na forma de água de poros da pasta de cimento

endurecida. Os processos reagem pela disponibilidade do ferro no estado metálico sobre a superfície do aço, com a presença de água e oxigênio formando íons Hidroxila (OH)- para o processo catódico e baixa a resistividade elétrica do betão, facilitando o fluxo de elétrons das áreas anódicas para as catódicas através de um condutor metálico (Figura 5).

Em relação ao processo catódico, deve haver um suprimento contínuo de oxigênio e água, condição que não é alcançada facilmente, quando os elementos de betão armado possuem um adequado recobrimento de betão de boa qualidade. Se o betão está saturado com água, a velocidade de difusão de oxigênio será muito lenta; mais rápida em betão relativamente seco; porém em contrapartida, os betões secos não são capazes de desenvolver a reação catódica, nem tampouco apropriados para redução da resistividade elétrica do betão, que é a terceira condição necessária para o desenvolvimento do processo eletroquímico [18].

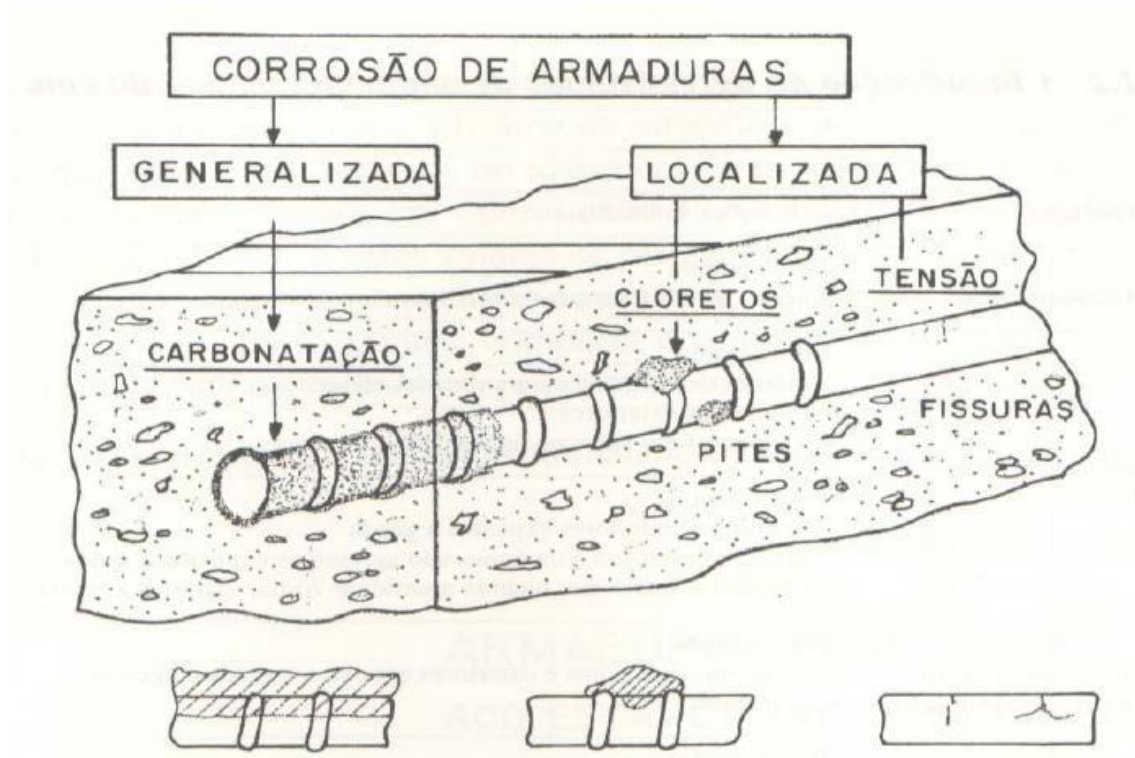


Figura 5: Tipos de corrosão de armadura [28].

É indispensável saber que os íons cloreto são fixados pela reação com C3A, formando cloroaluminato de cálcio e quanto maior for o teor e também maior for o consumo de cimento na mistura, maior será a quantidade de íons de cloreto que podem ser fixados.

O tipo de cimento com alto teor de C3A pode ser prejudicial em estruturas expostas ao mar, por ter maior libertação inicial de calor de hidratação e, conseqüentemente, em uma elevada temperatura. Os íons cloretos atuam como catalisadores, aumentando a velocidade da reação, intensificando a cinética da corrosão (Figura 6).

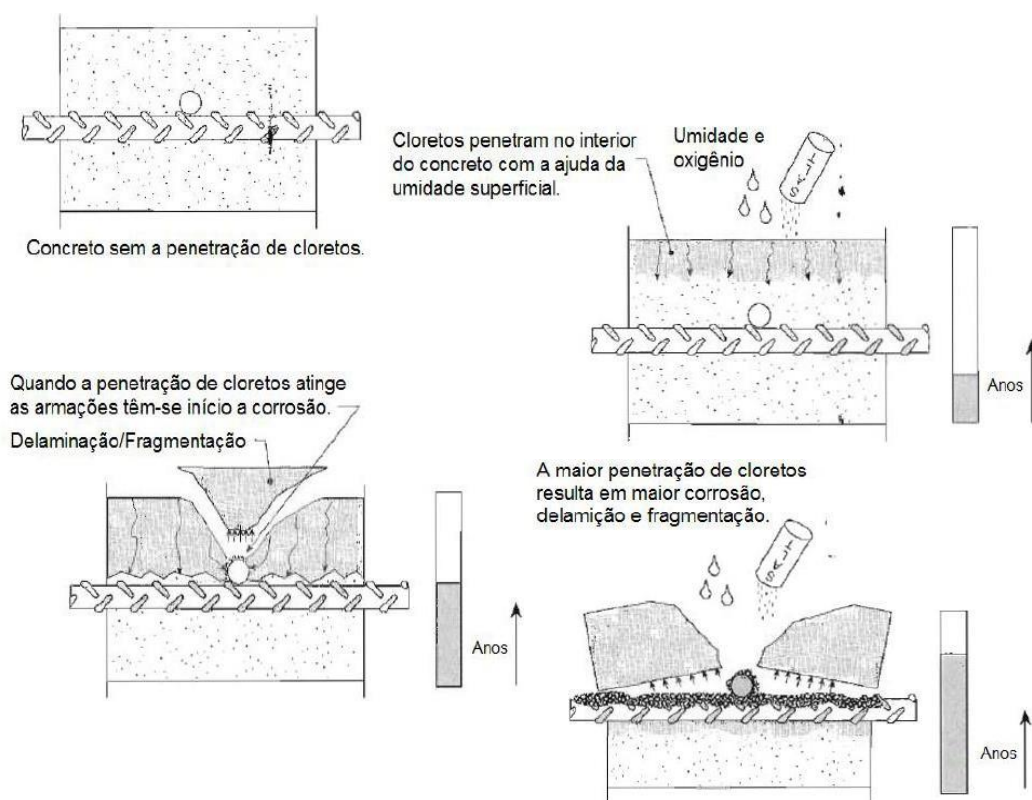


Figura 6: Processo de penetração de íons cloretos no interior do betão armado [30].

É notável nas leituras que o ataque de cloreto é o principal causador da corrosão das armaduras do betão, sendo constantemente presente na água do mar e no ambiente marítimo contaminado.

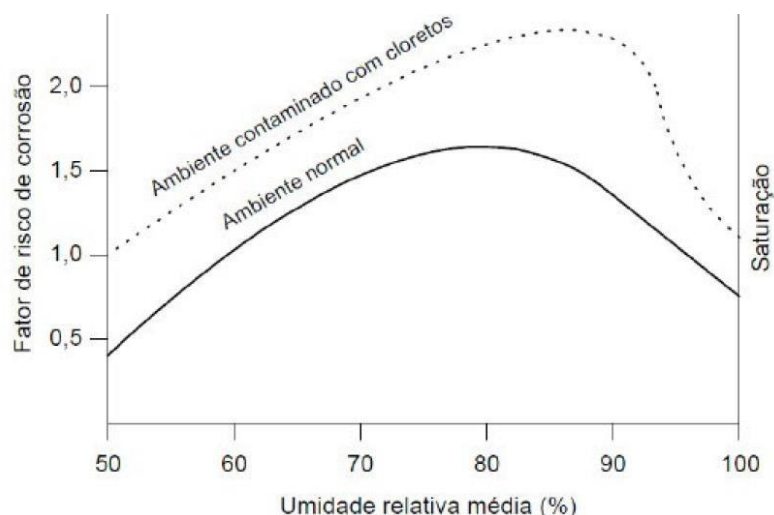


Figura 7: Aumento de risco de corrosão pelo ambiente contaminado em relação a umidade relativa [31].

Segundo [32], os efeitos do cloreto junto com a carbonatação, aceleram o processo de corrosão das armaduras. Isso pode ser muito comum pelo fato das duas ações possuírem fatores semelhantes que facilitam as ações (Figura 7).

A corrosão induzida por cloretos depende das características do betão, como permeabilidade e porosidade, além dos fatores que devem ser levados em consideração como o tipo de cimento, sendo o mais apropriado os que contém escória de alto-forno e pozolanas, porque possui menos hidróxido de cálcio.

A corrosão pode-se apresentar de diferentes formas. Em geral são classificadas pela extensão da área afetada, sendo as mais frequentes: generalizada, localizada, por pite e fissurante (Figura 8, Figura 9).



Figura 8: Corrosão de armaduras em pontes em zona de variação de maré [33].



Figura 9: Pilar sobre o mar após 10 anos de construção, deteriorado devido aos efeitos de carbonatação com íons de cloretos [34].

1.4.3 Lixiviação e Eflorescência

A umidade é uma das principais causas para a deterioração do betão, causando surgimento de manifestações patológicas. Para [35], as lixiviações ocorrem pela dissolução dos componentes da pasta de cimento por águas puras, carbônicas ou ácidas,

por meio de percolação de água em betão fissurado ou com alta permeabilidade, causando manchas conhecidas como eflorescência.

A eflorescência forma-se através do processo de lixiviação, pela dissolução e remoção dos compostos hidratados da pasta do cimento que quando entra em contato com a água, devido infiltrações, ocorre a dissolução dos cristais de hidróxidos de sódio e magnésio, migrando para a superfície do betão, e com a evaporação resulta então em depósitos salinos, com cor esbranquiçada chamada de eflorescência, e quando ocorre um depósito mais enfático, forma-se as estalactites.

Para [35], quando a estrutura de betão fica em contato permanente com a água, esta começa a provocar lixiviação dos componentes do betão (hidróxidos e sais), tornando-se susceptível à ocorrência de manchas e eflorescência, e quando se trata de estrutura do betão armado, a exposição da armadura à água, acompanhado da lixiviação dos componentes, expõe gravemente a armadura à oxidação, facilitada pela penetração dos agentes agressivos presente na água (Figura 10).



Figura 10: Presença de eflorescência [25].

1.4.4 Corrosão no Betão Armado

A água está totalmente ligada à corrosão do betão. São dois os processos principais de corrosão: a oxidação e a corrosão eletroquímica. A mais comum vista, é a corrosão eletroquímica, que ocorre em meio aquoso ou em ambiente com umidade relativa elevada ($UR > 60\%$). Não existe corrosão em betão secos e em saturados, por não haver eletrólito e acesso ao oxigênio.

Para que as armaduras de aço dentro do betão sofram corrosão é necessário que junto a elas haja umidade e oxigênio, pois o meio que elas estão mergulhadas é alcalino [36].

A corrosão é mais propensa em ambientes onde o betão encontra-se parcialmente saturado ou submerso, sujeitos a ciclos de molhagem e secagem. Neste caso, criam-se distúrbios, onde ocorre os processos anódicos e catódicos.

O efeito da corrosão é nocivo à armadura, tal como observado na Figura 11, reduzindo a secção de armadura transversal, tendo como consequência uma perda de capacidade de carga. Outro efeito da corrosão das armaduras é o carácter expansivo das reações envolvidas no processo, no momento da formação da ferrugem, seu volume pode atingir até seis vezes o volume do aço, sendo então, responsável por causar a fissuração e o destacamento do cobrimento do betão.

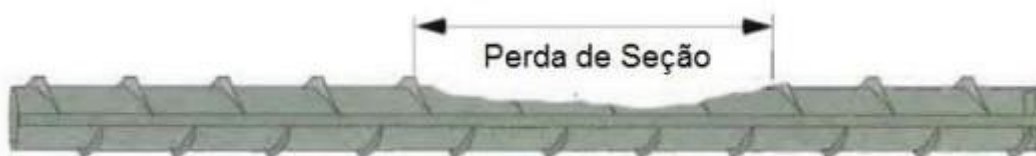


Figura 11: Perda de seção na barra de aço devido à corrosão eletroquímica.

Para [33], a disponibilidade de água nos poros do betão está associado com mecanismo de transportes, que regem as trocas com o meio ambiente e a disponibilidade

de água livre para participar e propiciar as reações de degradação, e a presença de umidade no interior dos poros, interfere na velocidade de corrosão das armaduras, pois o processo de corrosão das armaduras, é eletroquímico e necessita de água para que os íons possam se movimentar e gerar correntes de corrosão.

[37] Menciona-se que a corrosão de armaduras ocorre pela perda progressiva da alcalinidade pela carbonatação, com redução do pH do betão, despassivação de armadura, e pelo ataque de íons de cloreto, com a penetração de cloreto até atingir a armadura, tornando-se passível de oxidação, causando expansão, fissuração e lascamentos em peças de betão (Figura 12).

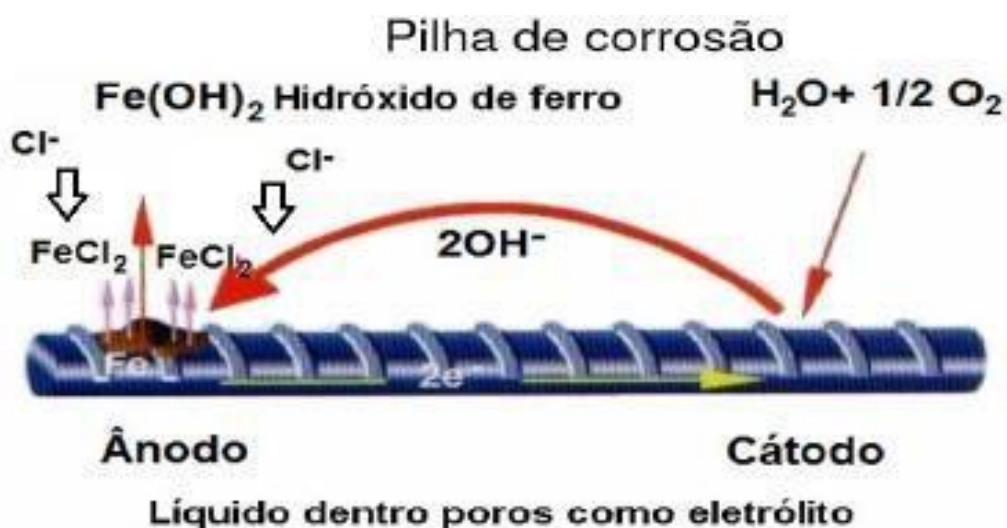


Figura 12: Despassivação da armadura por cloretos [38].

Segundo [18], a transformação de um aço metálico em produtos de corrosão, é acompanhada por um aumento no volume, o qual dependendo do estado de corrosão, pode chegar até 600 por cento do metal original. Portanto, esse aumento de volume causa

a expansão e fissuração do betão, e com o passar do tempo leva ao descolamento do betão de recobrimento (Figura 13).

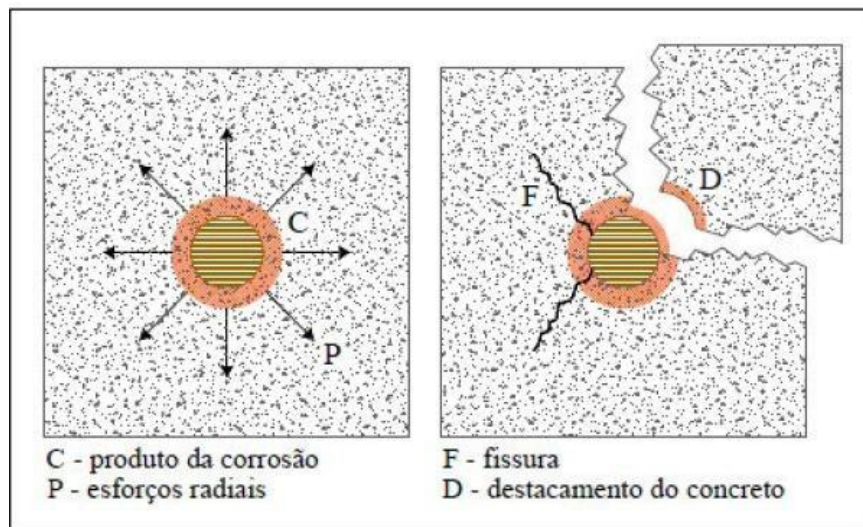


Figura 13: Aumento do volume do aço, provocado pela corrosão [39].

As armaduras podem sofrer as seguintes formas de corrosão eletroquímica, as quatro últimas abaixo são extremamente graves quando existe ação simultaneamente entre mecânica e meio corrosivo, ocasionando a corrosão sob tensão fraturante (Figura 14, Figura 15).

- Corrosão uniforme: Corrosão em toda extensão da armadura quando fica exposta ao meio corrosivo;
- Corrosão puntiforme ou por pite: Os desgastes são localizados sob a forma de pequenas cavidades; também chamadas alvéolos;
- Corrosão intragranular: É processada entre os grãos dos cristais do metal e quando os vergalhões sofrem, principalmente, tensões de tração, podem fissurar ou fraturar perdendo sua estabilidade;
- Corrosão transgranular: Que se propaga em forma de trincas no interior dos grãos do material, podendo levar à fratura da estrutura, quando houver esforços mecânicos;

- Fragilização pelo hidrogênio: Corrosão originada pela ação do hidrogênio atômico na sua difusão pelos vergalhões da armadura, sendo este tipo de corrosão bastante rara.



Figura 14: Vista inferior da laje do tabuleiro, mostrando deslocamento do betão e corrosão da armadura [16].



Figura 15: Viga principal em betão deslocado e corrosão de armaduras, da Ponte sobre o rio Várzea I, em Piauí [25].

1.4.5 Erosão

A erosão é um fenômeno manifestado no betão armado em contato com a água corrente, que possuem partículas sólidas conduzidas pela água, trazendo danos causados pela formação de cavidades em fluxos de água com grande velocidade.

Os pilares imergidos na água do rio criam obstáculos que modificam os mecanismos de escoamentos dos rios, aumentando sua velocidade, a vorticidade, e a presença de redemoinhos, causando cavidade de erosão junto as estruturas.

Quando não são realizados planeamentos e projetos adequados para prevenção de erosão, o resultado interfere na estabilidade dos elementos de fundação, podendo provocar sua ruptura. A pressão dinâmica atua transversalmente sobre os pilares e de sua forma, da sua velocidade e da parte exposta a água corrente.

De acordo com [28], a erosão é o desgaste causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas finas suspensas.

Segundo [18], existe três tipos de desgaste superficial do betão, por partículas suspensas, pela ação das ondas, partículas da areia, do gelo, a erosão pela maré que carrega sais e areia; e a cavitação pela ação das ondas, e conseguinte formação de bolhas de ar que também pode desgastar a superfície (Figura 16).

A ação das cheias possui um efeito com a possibilidade de causar graves danos a uma ponte devido à rápida elevação do nível da água, relacionada a grandes descargas e velocidades. A taxa de erosão superficial dependerá da porosidade e da resistência do betão, da quantidade, tamanho e dureza (Figura 17).

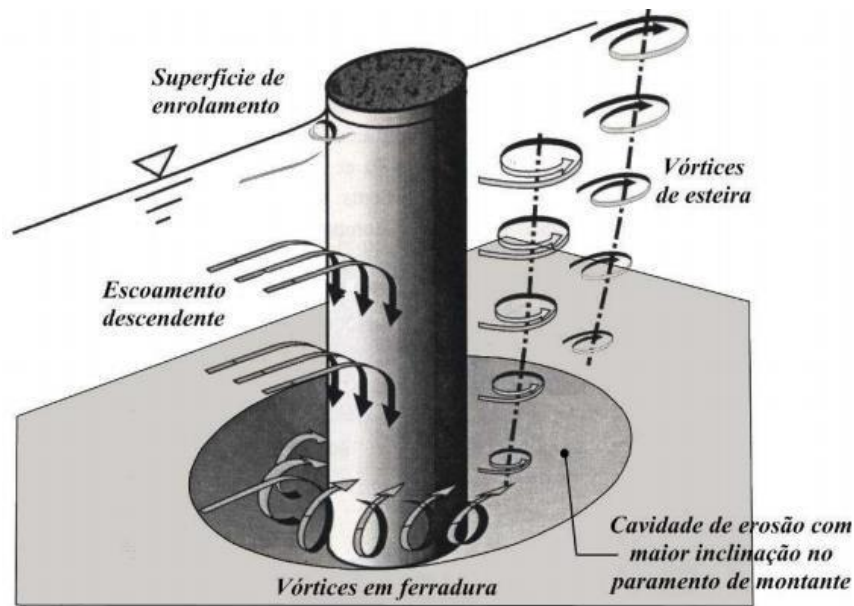


Figura 16: Movimentos efetuados pela correnteza em torno dos pilares de uma ponte [40].



Figura 17: Erosão acentuada na fundação e no pilar da ponte da cidade de Sobral-Ceará [41].

1.4.6 Betão Desagregado

A desagregação do betão consiste na sua desintegração, perdendo a sua propriedade de aglomerante, tendo seu agregado graúdo se destacando da argamassa, que subsequente se desfaz também.

Segundo [13], compreende-se como desagregação a própria separação física de placas ou fatias de betão, com a perda da capacidade resistente a esforço na região desagregada. Já segundo [42], relata que os componentes do betão perdem sua coesão, reduzindo significativamente sua resistência mecânica. Segundo [43], menciona que é ocorrido pela expansão devida a oxidação ou dilatação das armaduras, pelo aumento do volume de betão quando este absorve água, gerando tensões tangenciais não previstas, podendo ocorrer também devido às movimentações estruturais e choques na estrutura.

A desagregação do betão pode ocorrer por diversos fatores: ataques biológicos, ataques químicos como o sulfato, movimentação das fôrmas, corrosão, fissuras, calcinação do betão, erros na execução e ataque das águas puras e servidas.

1.4.7 Fissuras

A presença de fissuras no betão armado é um tipo de manifestação patológica ainda complexa, devido à sua origem e a combinação de diversos fatores e mecanismos.

As fissuras podem ter início desde a pega do cimento em seu estado fresco, com dois fenômenos: a libertação de calor e secagem (retração), e a troca de água pela face exposta, mesmo quando há cura e no estado endurecido, que normalmente são descritos por fenômenos físicos, térmicos, químicos e estruturais. As fissuras podem surgir logo após o lançamento do betão, até seus anos prolongados.

A manifestação de fissuras é indício de que a estrutura houve diminuição da sua durabilidade e segurança, comprometendo a sua utilização tanto na redução de sua vida útil, quanto ao prejuízo ao seu funcionamento e estética, podendo causar a corrosão da armadura, quando esta se encontra em ambiente agressivo [44].

A Figura 18 mostra a fissura resultante da corrosão do aço, na direção paralela à barra corroída. As fissuras podem ser classificadas como fissuras ativas progressivas, cujas aberturas vão aumentando com o decorrer do processo corrosivo. Este progresso das fissuras implica no lascamento do betão e no destacamento da camada de cobrimento, deixando expostas as armaduras [45].

A posição das fissuras nos elementos estruturais pode evidenciar a causa ou as causas que as motivaram, apresentando como manifestação patológica. As fissuras se diferenciam pelo movimento relativo por serem ativa ou passiva, pela sua abertura, espaçamento e direção.

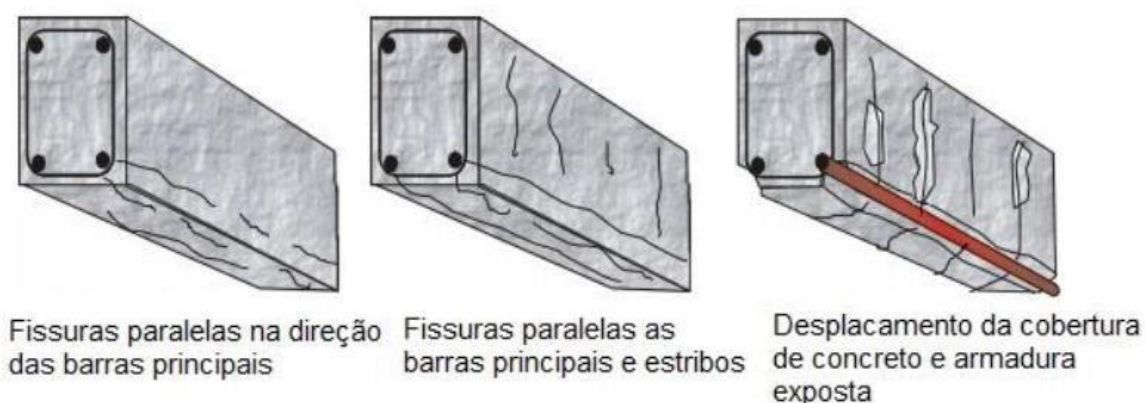


Figura 18: Progresso das fissuras em um processo corrosivo [46].

Outro fator importante, para o surgimento de fissuras antes mesmo de produzir o betão, é a incompatibilidade entre projetos de arquitetura, projetos de estruturas e fundações, sendo mal detalhados, mal planeados e fiscalizados, além da ausência de uma mão de obra bem treinada e materiais inadequados.

Retirando esse enfoque das fissuras surgirem, antes mesmo do lançamento do betão, leva-se em conta que as fissuras são provocadas por fenômenos de movimentações provocadas por variações térmicas e umidade, atuação de sobrecarga ou concentração de tensões, deformabilidade excessiva das estruturas, recalques diferenciais das fundações,

retração de produtos à base de ligantes hidráulicos e alterações químicas de materiais de construção (Figura 19).

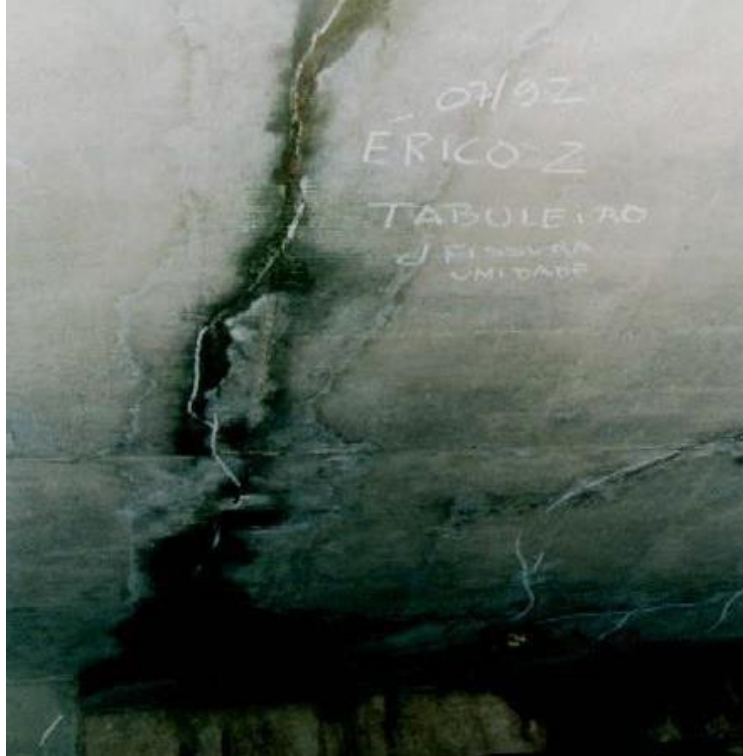


Figura 19: Fissuração da laje inferior da Ponte Érico Veríssimo [47].

Segundo [1], a ocorrência de fissuras é um fenômeno bastante comum nas pontes de betão armado em todo o mundo. Entretanto [2], o betão é um material com baixa resistência à tração e as fissuras inerentes a essa solicitação é comum; já no caso de fissuras por compressão, o estado da estrutura é mais crítico, pois o betão está sob o efeito de esmagamento e ruptura frágil. Segundo [42], o betão é um material não resistente à tração e que colapsa repentina e explosivamente. Entretanto, seu número, localização e abertura são fatores decisivos para degradação das estruturas (Figura 20).



Figura 20: Fissuração por retração hidráulica/térmica na Ponte Vicente da Fontoura [47].

2 CASOS DE ESTUDO: DESCRIÇÃO E INSPEÇÃO VISUAL

2.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo tem como finalidade identificar e diagnosticar, em dois casos de estudo, as zonas que apresentaram manifestações patológicas precoce após manutenção corretiva. Entretanto, a fim de obter maior durabilidade, são elaboradas propostas de intervenção com o propósito de prolongar a durabilidade das estruturas, até a próxima manutenção corretiva.

Os casos de estudo são baseados nas pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes, localizadas sobre o Rio Poxim na Avenida Beira Mar, cidade de Aracaju-Sergipe (Figura 21). As pontes são paralelas (Figura 22) e possuem estrutura em betão armado. As construções foram realizadas em épocas diferentes: Juscelino Kubitschek na década de 50 e Paulo Barreto de Menezes na década de 70.

As duas pontes possuem uma única faixa de rodagem de sentido único e estão inseridas em ambiente marítimo, com presença de variação de maré, elevadas umidade e temperatura, que podem influenciar na penetração de agentes agressivos no betão.



Figura 21: Pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes [48].



Figura 22: Ponte da direita Juscelino Kubitschek, em direção a Orla, e a esquerda Ponte Paulo Barreto Menezes em direção ao centro de Aracaju [49].

2.2 Ponte Juscelino Kubitschek

2.2.1 Projetos e Elementos Geométricos

Estruturalmente, a ponte é considerada uma obra de arte especial executada em betão armado, em viga, com 160 m de comprimento e 8,30 m de largura, reta ortogonal, com cinco vãos de 27 m e balanços nas extremidades (Figura 23). As longarinas são isostáticas, contínuas e simétricas (Figura 24). O vão central também isostático e apoiado em dentes “Gerber”, produzidos nas duas únicas longarinas que são contraventadas por travessas e pelo tabuleiro, formando um elemento único monolítico, com aparelho de apoio elastomérico neoprene fretado. Apresenta duas vias de tráfego de mesmo sentido, guarda-corpos com uma altura de 60 cm, drenos espaçados e ausência de lancil pingadeira (Figura 25).

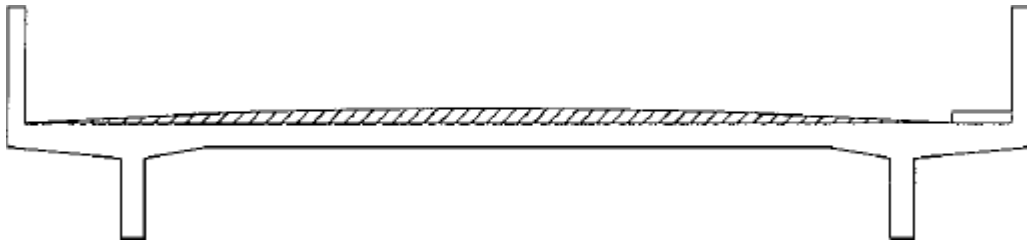


Figura 23: Corte transversal esquemático da Ponte Juscelino Kubitschek [50].

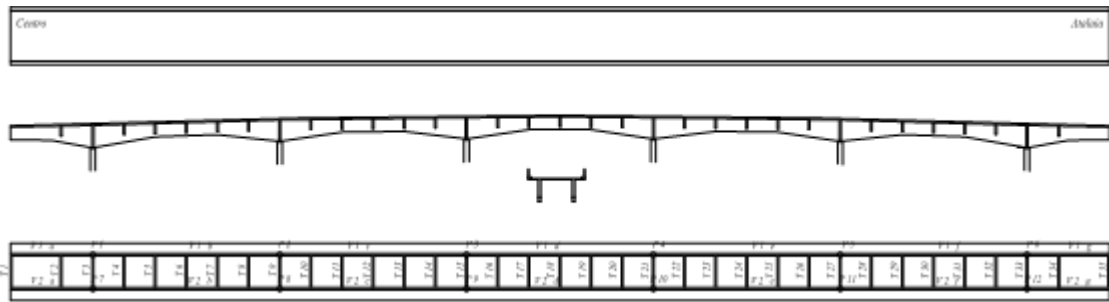


Figura 24: Corte longitudinal esquemático da Ponte Juscelino Kubitschek [50].

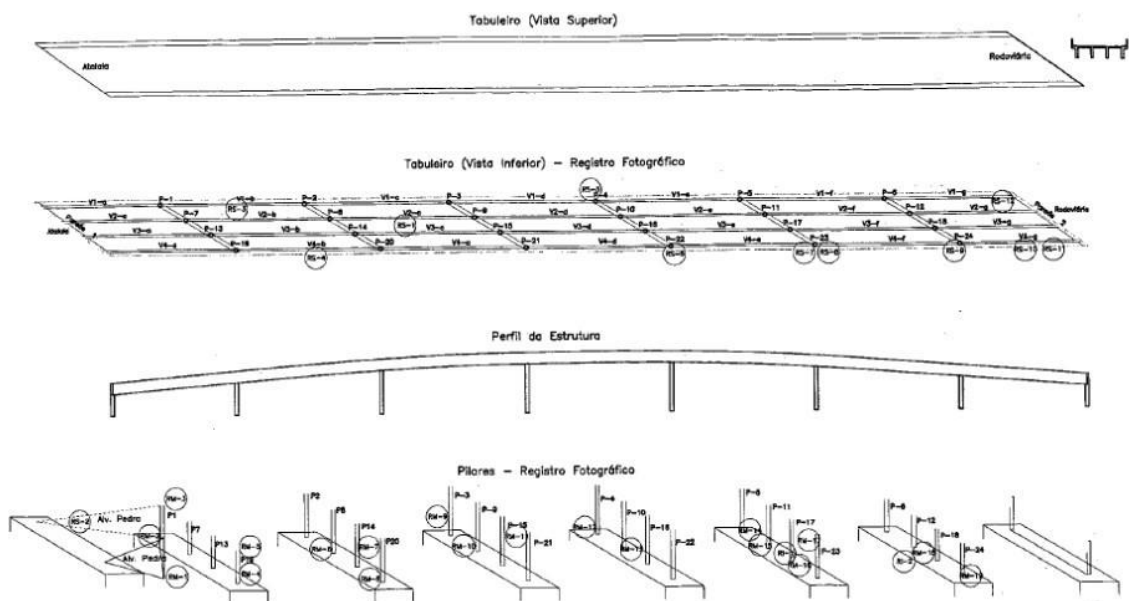


Figura 25: Croqui esquemático da estrutura da Ponte Juscelino Kubitschek [50].

2.2.2 Métodos Construtivos

Na parte da infraestrutura foi realizada fundação profunda em estacas e blocos de coroamento, que são ligados aos pares de pilares de secção octogonal que dão

sustentação aos pares de longarinas. Ao total são três pares de pilares submersos, sendo todos simétricos, com mais dois blocos localizados em cada cabeceira da ponte.

Na superestrutura, as vigas de sustentação foram executadas in loco, com escoramento apropriado, situando-se ao longo da extensão da ponte, simplesmente apoiada em balanço, possuindo secção variável em forma de arco. O tabuleiro superior foi construído em forma contínua e horizontal, com três segmentos de tramos para diminuir o número de juntas na pista de tráfego. O vão central apoiado em dentes Gerber produzidos nas duas únicas longarinas são travadas por transversas e o tabuleiro em posição superior, seção transversal da ponte é em “T”. As longarinas isostáticas, contínuas e simétricas constituem dois vãos internos e dois balanços, sendo o vão central, também isostático, repousando sobre o apoio Gerber, e através do aparelho de apoio de neoprene fretado. A drenagem da ponte é efetuada com tubo de queda de 10 cm de diâmetro, afastados em cada 4 metros e colocados nos dois alinhamentos transversais da pista de rolamento. A junta tem 5 cm de espessura e seu material é elastomérico de compressão com grande espaçamento entre elas.

2.2.3 Materiais da Superestrutura e Mesoestrutura

A construção foi efetuada através de betão armado, F_{ck} : 30 MPa bombeado, com varões em aço CA-50. O betão utilizado, à proporção da razão água-cimento (a/c) e tamanhos dos agregados, foi especificado de acordo com a finalidade e exigências estruturais de cada elemento da ponte.

2.2.4 Descrição dos Reparos Feitos

No local onde o betão foi diagnosticado deteriorado retirou-se, cuidadosamente, as partes comprometidas com ponteiros e ferramentas pneumáticas, numa profundidade de 3 cm de forma a alcançar o betão original e homogêneo, e a limpeza das superfícies do betão e do aço foram realizadas através de jato de água de alta pressão. A ancoragem de armação foi executada utilizando resina polimérica tixotrópica do sistema epóxico, ou seja, adesivo estrutural compound. No reforço da armadura, foram utilizados pinos de aço especial CA 50 e cordões de pré-esforço de 18 mm chumbadas com adesivo epóxi na armadura existente, tal como mostra a (Figura 26 e 27). Para os revestimentos das armaduras foi escolhida argamassa tixotrópica, monocomponentes para reparos estruturais, aplicado com colher de pedreiro pressionando o material contra o substrato do centro para as bordas em camadas de 10 a 50 mm de espessura. Nos locais onde se observaram vestígios de corrosão das armaduras, o betão foi removido até a sua parte melhor, e as armaduras foram substituídas por aço CA 50 e cordões de pré-esforço de 18 mm (Figura 26).



Figura 26: Superposição de armaduras no encontro da ponte Juscelino Kubitschek [50].



Figura 27: Superposição de armadura no pilar da ponte [50].

Contra a corrosão eletroquímica foi dado um tratamento das armaduras pela proteção galvânica com aplicação de primer com alto teor de zinco, elaborado à base de resina sintética com cromato de zinco (Figura 28).



Figura 28: Tratamento das armaduras por proteção galvânica na viga longarina da ponte Juscelino Kubitschek [50].

Nos locais onde havia betão deteriorado e armadura oxidada, foi reconstituída a seção original da peça utilizando o Graute industrializado, com alta resistência mecânica e isento de cloretos. Para os reparos e reforços das estruturas em betão, foram utilizados

o cimento Portland CP-IV, com areia grossa lavada, brita 19 e aditivo plastificante, com o objetivo de reduzir a água de amassadura. No betão submerso, foi adotado o mesmo tipo de cimento, areia e brita, incluindo apenas um aditivo estabilizador anti-segregante, tendo em sua composição 450 kg de cimento por metro cúbico. Depois dos reforços nos pilares e blocos de coroamentos, realizou a limpeza da superfície e foi aplicado uma pintura protetora a base de alcatrão de hulha diluída em solvente em 10% (Figura 29).



Figura 29: Pilares e blocos de coroamento pintados com alcatrão, das Pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes [50].

Nas partes da mesoestrutura e infraestrutura aplicou-se 3 demãos de tinta impermeável cimentol, com intervalo de 8 horas entre cada pintura. Para evitar a secagem, a estrutura foi hidratada a cada 2 horas com água limpa. As fissuras e trincas foram feitas em forma de “V”, em seguida, foram abertos furos de 10 mm de diâmetro e espaçados de 10 a 30 cm, verificando a ligação entre os furos através de injeção de ar, logo após, foram instalados tubos plásticos de 5/16 de diâmetros nos furos e efetuadas as vedações das trincas com massa polimérica do sistema epóxi (Figura 30). Realizada as vedações das trincas, injetou-se resina polimérica para reparo estrutural no mesmo tubo plástico, até o completo preenchimento dos espaços vazios.



Figura 30: Reparos para fissuras com tubos plásticos num das longarinas da ponte Paulo Barreto Menezes [50].

2.2.5 Levantamento das Manifestações Patológicas Precoces Após Reparos

O surgimento de manifestações patológicas precoces na Ponte Juscelino Kubitschek, após manutenção corretiva de uma maneira gerais identificadas em 3.2.4, sugere a falta de um planejamento de manutenções periódicas, com um projeto de durabilidade com controle de qualidade, afeta diretamente na conservação das estruturas.

Na parte da mesoestrutura da ponte, na laje inferior do tabuleiro, foram identificados armadura exposta e com corrosão, eflorescência e deslocamento do betão (Figura 31). Na viga longarina, percebe-se deslocamento do betão e falha na qualidade da execução dos reparos realizados (Figura 32). No dente Gerber, a falta do neoprene e a ineficiência do dimensionamento dos varões, ocasionou a fissuração devido à compressão (Figura 33). Ao analisar a fissuração da ponte, nota-se que está presente em toda parte da estrutura, porém, suas origens diversificam, como a fissura encontrada no pilar que apoia uma das vigas longarina da ponte (Figura 34).

Além disso, na infraestrutura da ponte Juscelino Kubitschek, evidencia fissuras e eflorescência no pilar, facilitando a entrada de agentes agressivos, acelerando a corrosão até a perda da seção e rompimento da armadura (Figura 35). Nos blocos de coroamento é notório o estado crítico da estrutura, com rachaduras, deslocamentos do betão e erosão (Figura 36). Destaca-se que, todos os pilares da ponte, nas zonas de variação de maré manifesta com pontos de corrosão e segregação do betão (Figura 37).



Figura 31: Corrosão com armaduras expostas, eflorescência e deslocamento de betão, na face inferior do tabuleiro da ponte Juscelino Kubitschek.



Figura 32: Falha na execução nos reparos da viga longarina e deslocamento de betão na Ponte Juscelino Kubitschek.



Figura 33: Fissuras no encontro do dente Gerber da Ponte Juscelino Kubitschek.



Figura 34: Fissuras na parte que faz a ligação da viga longarina com pilar na ponte Juscelino Kubitschek.



Figura 35: Fissura horizontal e mancha de eflorescência no pilar da mesoestrutura da ponte Juscelino Kubitschek.



Figura 36: Deslocamento e rachaduras no bloco de coroamento da Ponte Juscelino Kubitschek.



Figura 37: Pontos de corrosão e segregação de betão nas arestas do pilar da Ponte Juscelino Kubitschek.

2.3 Ponte Paulo Barreto de Menezes

2.3.1 Projetos e Elementos Geométricos

Obra de arte especial executada em betão armado, com seção em transversas, prolongamento do balanço em estrutura metálica para ciclovia, percorrendo em toda sua extensão. Com 155 m de comprimento e 8,33 m de largura, cinco vãos vencidos por vigas longitudinais contínuas travadas por vigas solidárias ao tabuleiro, constituindo componente único.

A ponte possui duas faixas de tráfego em sentido único, com 7 m de largura, um lancil de 40 cm de altura e proteção insuficiente com elementos tubulares em ferro, que separa da pista de rodagem com uma passarela adaptada, de 3,30 m de largura, possuindo como barra de proteção uma mureta em perfil metálico de 1 m de altura. As longarinas são vigas isostáticas e contínuas, que se apoiam nos pilares através de aparelhos elastoméricos, os drenos são espaçados a cada três metros, para o sistema de drenagem de águas pluviais, foram executados com tubos de PVC de 10 mm de diâmetro.

2.3.2 Métodos Construtivos

Apresentam estruturas semelhantes com a Ponte Juscelino Kubitschek, com fundação profunda em estacas e blocos de coroamentos, onde surgem pares de pilares de secção octogonais, que dão sustentação a pares de vigas longarinas em forma de arco em toda extensão, porém, depois de 10 anos construída a Ponte, foi executado um prolongamento de balanço, com betão e estrutura metálica, e espessura de 3.30 metros servindo como ciclovia.

2.3.3 Materiais

A sua construção foi de betão armado com aço executadas in loco, o betão utilizado à proporção da a/c e tamanhos dos agregados, foram de acordo com a finalidade e exigências estruturais de cada elemento da Ponte. Foi construída com o passar dos anos uma ciclovia, com prolongamento de 3,30 metros em balanço com estrutura metálica e betão armado. Na parte do suporte da ponte, o muro de contenção foi construído com pedra e argamassas.

2.3.4 Levantamento das Manifestações Patológicas Precoces Após Reparos

A ponte Paulo Barreto de Menezes, apesar de ter sido construída após 20 anos da ponte Juscelino Kubitschek, apresenta manifestações patológicas semelhantes, mesmo depois dos reparos, principalmente na parte da ciclovia, executada em seguida da sua construção, expondo manchas de umidade por dreno pluvial danificado. (Figura 38). Nota-se que, ao longo da laje inferior, existe a presença das mesmas manifestações, a oxidação na estrutura metálica que apoia a laje da parte da ciclovia, e fissuras ocasionados por corrosão (Figura 39). Observa-se na (Figura 40), deslocamento da alvenaria, corrosão nos varões e oxidação no suporte da laje. Na parte da infraestrutura da ponte, é possível constatar manchas de corrosão e fissuras nas arestas dos pilares (Figura 41).



Figura 38: Manchas de umidade na laje inferior da extremidade da ponte, por falha na drenagem pluvial no dreno.



Figura 39: Oxidação no suporte da laje em balanço, mancha de umidade pelo dreno, fissuras com início de corrosão.



Figura 40: Desplacamento da alvenaria, corrosão na armadura e oxidação no suporte da laje inferior da ciclovia.



Figura 41: Corrosão e fissuras nos pilares da infraestrutura.

2.4 Proposta de Soluções de Intervenção Nas Duas Pontes

Em função da descrição dos reparos feitos e do levantamento das manifestações patológicas, em seguida são listadas uma série de propostas de intervenção de manutenção corretiva das respectivas pontes.

Betão deteriorado: Remover com jateamento de ar comprimido, por precisar que os materiais dos reparos necessitem de substrato seco. As estruturas de betão produzidas com cimento de escória granulada de alto-forno revelam, geralmente, um desempenho claramente melhor em ambiente com presença de cloretos, do que aquelas construídas com cimento Portland puros, podendo reduzir a difusividade do cloreto por um fator de 50 vezes [51]. De acordo com a norma NF EN 197-1 [52], a utilização da escória de alto-forno e sílicas ativas melhoram a resistência do betão aos ataques sulfáticos. A reconstituição do revestimento foi de 100 mm, por ser uma zona de variação de maré e respingos, além do revestimento de proteção na superfície com resina epóxi de 2 mm a 3 mm, atingindo uma excelente adesão entre o substrato do betão e o revestimento.

Ancoragem de Armação: Analisar o tipo de ancoragem, se será adotado por barras de armaduras / chumbadores, ou por ancoragem química, utilizando Grount ou Resina epóxi. Com a primeira etapa concluída, realiza-se o ensaio de arrancamento ou ensaio em laboratórios, conforme a NBR DNIT 082/2006 [53]. A escolha mais eficaz, seria na utilização de Grount, por ser um tipo de resina recomendado nos casos de esforços de compressão, pilares ou fundações. Então, finaliza-se com um projeto detalhado da execução.

Reforço de armadura: Verificar se ocorreu perda de seção da armadura para substituir ou adicionar. Aplicar na armadura, uma pintura epoxídica rica em zinco, onde este trabalha como ânodo de sacrifício em benefício do aço. Na parte da argamassa, os cimentos são especiais e/ou combinados com resina epóxi. Próximo passo a impregnação

hidrofóbica, por conseguinte na parte do reforço, a aplicação de FRP (“fiber reinforced polymer”) feito com fibra de carbono. O FRP é um excelente aliado na prevenção da deterioração do betão em ambientes agressivos. Vários países têm desenvolvido projetos de pontes em ambientes severos, utilizando as fibras. [54] [55].

Revestimento das armaduras: Aplicação de revestimento epoxídico na armadura para proteção, adicionar no betão, inibidores catódicos que atua reprimindo as reações catódicas, utilizar aditivo mineral com ação pozolânica mais o aditivo superplastificante.

Os efeitos principais do aditivo mineral são: aumento de resistência mecânica e durabilidade, melhor aderência, reduz porosidade e permeabilidade, a penetração de cloretos e a trabalhabilidade. Para não prejudicar a trabalhabilidade, é adicionado o aditivo superplastificante. A resina epóxi na armadura funciona como barreira física com 180 µm e 300 µm, por último, na superfície do betão utilização de hidrofugantes de silicones, possuindo como mecanismo básico a formação de uma película, que atua como barreira à penetração de líquidos, vapores e gases.

Pontos de corrosão na armadura: A substituição da armadura que perdeu a seção, por aço inoxidável, nas partes adjacentes da estrutura com corrosão, empregar proteção catódica seguida de inibidores de corrosão com nitrato de cálcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, que tem como função prevenir e até de reduzir a corrosão. A eficiência, porém, depende de uma proporção entre nitrato e cloreto entre 0,5 e 1,0 [56] [57]. O betão mais adequado ao ambiente agressivo, é com cimento de escória de alto-forno e redução no recobrimento para $85 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$, por ser aço inoxidável. Por final, na superfície do betão, a aplicação de pintura epóxídica.

Corrosão eletroquímica: Proteção catódica por corrente imposta e revestimento epóxídicos nas armaduras, adição de inibidores de corrosão no betão fresco e a utilização de cimento de escória de alto-forno 70%, combinado com 10% de sílica ativa. Na parte

da superfície do betão, pode ser aplicado o tratamento hidrofugante, logo após a concretagem, porque se o tratamento for aplicado tardio, há possibilidade de os cloretos penetrarem no betão.

Armadura oxidada: Substituição parcial da armadura oxidada por aço inoxidável, recobrimento de 85 mm para 10 mm, utilização de cimento de escória de alto-forno 70%, combinado com sílica ativa de 10% e impregnação hidrofóbica na superfície.

Reparos e Reforços: Aplicação do polímero de Fibra de Carbono reforçada (FRP) unidirecionais, na área que necessita de reforço. Nas partes dos reparos, utilização de betão modificado com látex (CML), que é um betão convencional obtido com substituição parcial da água do amassamento por látex (emulsão de polímeros). O CML, possui excelente capacidade de adesão ao betão antigo e grande durabilidade a soluções agressivas. Na superfície do betão que não foi reforçado com FRP, aplicar revestimento com resina epóxi.

Betão submerso: Executar com betão auto adensável, adicionar modificadores de viscosidade e anti-washout (VMA), para que não haja dispersão do betão ao entrar em contato com a água, e apresentar exsudação nula. Ao elaborar o betão, utilizar cimento de escória de alto-forno 70% com 10% de sílica ativa, relação $a/aglomerente \leq 0,40$, com consumo mínimo de 330 kg/m^3 . Na etapa do recobrimento, efetuar com 80 mm e, por final, realizar a prevenção catódica sob a forma de ânodos de sacrifício.

Bloco de coroamento: Reforços estruturais nos blocos de coroamentos, com o encamisamento do bloco existente adotando betão auto adensável, com $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$, em seguida, protensão externa por meio de barras rígidas Dywidag no comprimento do bloco, garantindo uma maior durabilidade e eficiência na transferência e distribuição das cargas para a estrutura. Nesse tipo de reforço, pode existir a necessidade de nova estaca no encamisamento, a depender do projeto estrutural.

Pintura Protetora a base de Alcatrão de Hulha: Limpeza da superfície, através de jatos de ar comprimido, removendo materiais soltos e secagem da superfície para receber o material. A seguir, revestimento de superfície, com base de poliuretano, que possui alta resistência contra raios ultravioleta e ataques químicos, garantindo uma maior durabilidade.

Preenchimento de Trincas: Investigar as causas das fissuras, se são ativas ou passivas. Após diagnóstico, se for ativa devem ser preenchidas com material elástico e não resistente, como resinas acrílicas e poliuretânicas. As fissuras passivas, é indicado a injeção de um material resistente e aderente, como resina epóxi. Fissuras com abertura menor que 0,1 mm, a injeção deve ser realizada sob baixa pressão, enquanto as fissuras com aberturas maiores, superior a 3,0 mm, a injeção é feita por gravidade. Após todo o processo de injeção nas fissuras passivas, realiza-se a selagem para vedar as bordas das fissuras com material aderente. Antes da injeção ocorrer, deve ser realizado um teste com ar comprimido entre os tubos, de modo a averiguar se está havendo ligações entre ambos e a qualidade da selagem. Nas fissuras ativas, com aberturas menores que 10 mm, a selagem é realizada apenas vedando os bordos, mas quando estiverem entre 10 mm e 30 mm, é necessário executar um sulco em formato de “V”, com profundidade e largura de aproximadamente 10 mm e 30 mm, após abertura, limpeza, e na parte do enchimento, utilizar Graute, selando as bordas das fissuras com produto à base de resina epóxi.

Oxidação na estrutura metálica do suporte da laje inferior da ciclovia e deslocamento da alvenaria: Reparar o betão armado degradado, retirar o suporte metálico da laje da ciclovia e o material de alvenaria, substituindo por betão armado, utilizando resina epóxi como elementos de ligação entre betões de idades diferentes. Para reforço da estrutura, a aplicação de pré-esforço exterior, com forças centradas na vertical e horizontal. Na parte do tabuleiro, optou-se por reforçar com fibras de carbono na face

superior da consola, dispostas transversalmente, de modo a aumentar a capacidade das secções de encastramento para momentos negativos, e na face inferior da extremidade da consola, dispostas longitudinalmente, de modo a aumentar a capacidade resistente dessa zona para momentos positivos.

Em suma, a Tabela 9 resume a proposta de intervenção em função do tipo de reparo, os trabalhos executados e a descrição dos procedimentos da manutenção corretiva com objetivo de alcançar maior durabilidade das estruturas das duas pontes. Uma vez que as pontes têm de uma forma geral as mesmas manifestações patológicas, optou-se por unir em uma só tabela a proposta de intervenção para ambas.

Tabela 9. Proposta de intervenção para evitar deterioração precoce em função dos reparos efetuados nas pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes.

TIPO DE REPARO	TIPO DE REPARO	FUNCIONOU?	PROPOSTA DE INTERVENÇÃO
Betão Deteriorado.	Remoção de partes comprometidas com ponteiros e ferramentas pneumáticas para alcançar o betão original, limpeza do betão e aço através de jato d'água.	Não. O jato de água não é recomendado quando o material do reparo requer substrato seco.	1º Remoção do betão deteriorado com jateamento ar comprimido. 2º Reparação com betão projetado utilizando cimento de escória de alto-forno com sílica, por agregados que não sejam calcários ou dolomíticos. 3º Reconstituição do recobrimento e revestimento na superfície com resinas epoxídicas.
Ancoragem de Armação.	Executado utilizando resina polimérica tixotrópica do sistema epóxico.	Não. Não foi executado de acordo com a Norma do DNIT 082/2006, que define a sistemática a ser adotada na recuperação de Obras de arte-especiais, onde seja necessário a execução de fases para a ancoragem de armaduras de barras em betão armado.	1º Execução do ensaio de arrancamento, de acordo NBR 13528 ou ensaio químico, para averiguar o comportamento da resina, definindo-se a utilização da resina, Grout ou epóxi. 2º Segundo Norma do DNIT 082/2006, analisar fatores a serem considerados de suma importância: A resistência da ancoragem, de escoamento e ruptura, o diâmetro do furo, o equipamento de perfuração utilizado, o comprimento do embutimento, o espaço entre o diâmetro da barra a ancorar, e o diâmetro do furo, o estado e a resistência do betão, o tipo e a direção da

			carga a aplicar, os espaçamentos entre as ancoragens e as extremidades do elemento estrutural. 3º Verificar se, a ancoragem é em pilares ou em fundação, por serem casos de compressão, é recomendado o Graute, e no caso de flexão ou impossibilidade de fazer furos com diâmetros grandes, usa-se Resina Epóxi. 4º Realizar projeto detalhando o sistema de ancoragem, assim como sua minuciosa execução.
Reforço de Armadura.	Executado com pinos de aço especial CA50, e arame recozido chumbados com adesivo epóxi na armadura existente.	Não. Possível facilidade de corrosão do aço e do arame, ocasionado pelo ambiente agressivo.	1º Analisar se houve perda de secção maior que 10% para adicionar ou substituir armadura. 2º Aplicação de primer epoxídico com zinco, recomendado para locais agressivos. 3º Adição de argamassas formuladas com cimentos especiais e/ou combinados com resina epóxi. 4º Impregnação hidrofóbica. 5º Aplicação de tecido em fibras de carbono não corrosivas (colagem externa).
Revestimento das Armaduras.	Utilização de argamassa tixotrópica monocomponentes, para reparos estruturais aplicado com colher de pedreiro, pressionando o material contra o substrato do centro para as bordas em camadas ou 10 a 50 mm.	Não. Destacamento do betão deteriorado, podendo gerar fissuras com futura corrosão. Procedimento executado de reparos ineficaz.	1º Aplicar revestimentos epoxídicos na armadura. 2º Adicionar na massa do betão, inibidores de corrosão com nitrato de cálcio $Ca(NO_3)_2$ e aditivos. 3º A espessura do revestimento deve compreender entre 180 µm e 300µm. 4º Pintura protetora hidrofugante de silicone.
Pontos de Corrosão na Armadura.	Betão removido até sua parte melhor, e as armaduras foram substituídas por aço CA50 e arame recozido 18.	Não. Surgimento de novas pontas de corrosão. A Armadura substituída possui maior facilidade de corrosão do que a armadura de aço inoxidável. Falta de proteção na armadura e no revestimento.	1º Armadura que perdeu a seção foi substituída por aço inoxidável. 2º Nas partes próximas da corrosão e que a armadura foi substituída foi realizada a proteção catódica, seguida de inibidores de corrosão, adicionando ao betão fresco (cimento de escória de alto-forno e) nitrato de cálcio $Ca(NO_3)_2$. 3º Na superfície do betão, aplicação de pintura epóxica.
Corrosão Eletroquímica.	Tratamento das armaduras pela proteção galvânica, com aplicação de primer com teor de	Não. O sistema de proteção galvânica, não apresenta bons resultados ao betão, devido sua grande	1º Proteção catódica por corrente imposta na armadura. 2º Revestimento epóxi na armadura. 3º Adição de inibidores de corrosão no

	zinco. (Primer anticorrosivo, elaborado à base de resina sintética com cromato ou zinco.	resistividade. Somente utilizado para eletrólito de muito baixa resistividade elétrica. Em geral até 3000 Ω .cm	betão fresco, à base de nitrato de cálcio. 4º Utilizar cimento de escória de alto forno com sílica ativa. 5º Tratamento hidrofugante na superfície.
Armadura Oxidada.	Reconstituído da seção original da peça, utilizando Graute industrializado.	Não. O Graute é utilizado como objetivo para recuperação estrutural. Sua complexidade exige maior cuidado no uso, sendo necessária avaliação de um calculista para verificar a compatibilidade da resistência do Graute em relação à resistência final desejada. O betão ou reposição, deverá ter resistência no mínimo igual ao betão existente na estrutura.	1º Substituição parcial por armadura de aço inoxidável. 2º Recobrimento com a utilização de cimento de alto-forno com 70% de escória, combinado com 10% sílica ativa. 3º Impregnação hidrofóbica na superfície.
Reparos e Reforços.	Foram utilizados o Cimento Portland CP-IV, com areia grossa lavada, brita 19 e aditivo plastificantes, para reduzir a água do amassamento.	Não. O Cimento Portland para o clima de alta temperatura 30º, diminui sua vida útil para menos de 10 anos. O cimento CP-IV é utilizado por resistir apenas a sulfatos, mas para cloretos não. Na NBR 11768, os aditivos para betão com cimento Portland estabelecem redução mínima de 6% de água, se ocorrer superdosagem por consequência, há excessiva incorporação de ar e segregação dos materiais na mistura.	1º Aplicação de composto ou polímero de fibra de carbono reforçada (FRP) unidirecionais. 2º Utilização de betão modificado com látex. 3º Revestimento de superfície com resina epóxi.
Betão Submerso.	Adotado cimento CP-IV e adicionado aditivo estabilizado anti-segregante, tendo 450 kg de cimento por m ³ . Areia grossa lavada, brita 19 e aditivo plastificante.	Não. O cimento Portland para clima de alta temperatura, diminui sua vida útil para menos de 10 anos. Surgimento das mesmas manifestações patológicas.	1º Utilização de betão autoadensável com modificadores de viscosidade e anti-washout, relação a/aglomerante \leq 0,40, com consumo mínimo de 330 kg/m ³ . 2º Utilizar cimento de escória de alto-forno com sílica ativa. 3º Cobrimento de 80 mm. 4º Prevenção catódica sob a forma de ânodos de sacrifício.
Bloco de Coroamento.	Utilizado traço autoadensável com	Não. Surgimento de rachaduras,	1º Encamisamento do bloco existente com betão

	aditivo estabilizado anti-segregante tendo em sua composição 450 kg de cimento por m ³ . Utilizado CP-IV, areia grossa lavada, brita 19, aditivo estabilizado anti-segregante.	desagregação do betão e rachaduras, possivelmente por material utilizado e reparos feitos anteriormente, inadequados. O cimento Portland possui menor resistência.	autoadensável, de fck = 30 MPa. 2º Utilização de barras rígidas, dywidag na parte inferior do bloco.
Pintura Protetora a Base de Alcatrão de Hulha.	Inicialmente limpeza na superfície do betão, utilizando lixadeira elétrica e aplicação de jato de ar para remoção de pó e partículas soltas. Com a superfície solta aplicou-se uma demão de tinta, diluída em solvente em até 10% com a utilização de pincéis.	Não. 1º O alcatrão é proibido. Possuindo substâncias cancerígenas e nocivas à saúde de quem aplica e ao meio ambiente. 2º Possui vida útil relativamente curta.	1º Limpeza na superfície por jatos de ar comprimido, removendo o material mais rapidamente e seletivamente, sem provocar fissuras. 2º Revestimento de superfície para proteção com poliuretano.
Preenchimento de Trincas.	As fissuras ou trincas foram abertas em forma de “V”, em seguida foram efetuados furos de 10 mm de diâmetro e espaçados de 10 a 30 cm, e verificada intercomunicação dos furos através de injeção de ar. Foram instalados tubos plásticos de 5/16” de diâmetro nos furos, utilizando massa polimérica do sistema epóxi. Realizado a vedação, injeta-se a resina polimérica epóxi, de baixa viscosidade, para obter por completo o preenchimento de vazios.	Parcialmente. Falta de análise exata sobre as trincas e fissuras, em relação a serem ativas ou passivas nas estruturas, afetando assim, no tratamento correto e no desempenho.	Para fissuras passivas indica-se a injeção de um material resistente e aderente, resina epóxi. As fissuras ativas devem ser vedadas com material elástico e não resistente, como resinas acrílicas e poliuretano.
Oxidação metálica e deslocamento da alvenaria.	Pintura para metais com proteção anticorrosiva. Na parte da alvenaria, chapisco.	Não. Rápido oxidação das estruturas metálicas e degradação da alvenaria, ocasionado pelo ambiente agressivo.	Substituir o suporte metálico e a alvenaria, por betão armado, reforçando a estrutura com aplicação de pré-esforço exterior, com forças centradas na vertical e horizontal. Na parte do tabuleiro, reforçar com fibras de carbono, na face superior e inferior da consola, dispostas longitudinalmente e transversalmente.

2.5 Considerações Finais

Os problemas das manifestações patológicas existentes e diagnosticadas, nas Pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes, requerem uma nova intervenção corretiva com técnicas e materiais adequados para restabelecer a segurança estrutural e a funcionalidade das mesmas, por um longo período até atingir a próxima manutenção corretiva.

A proposta de soluções de intervenção deixa claro o comportamento distinto dos tipos de materiais propostos, com os materiais utilizados na manutenção corretiva, constatando a falta de entendimento sobre os materiais e execução, que reagem diretamente com o ambiente agressivo, diminuindo a sua eficiência num curto espaço de tempo. O betão indicado na proposta deste trabalho é apropriado à presença de cloretos, pelo que o cimento de escória de alto-forno e sílicas ativas têm a função de melhorar a resistência aos ataques sulfáticos. No reforço de armadura, a aplicação do FRP (“fiber reinforced polymer”) é apropriada na prevenção da deterioração do betão em ambientes agressivos.

O epoxídico proposto tem a função de proteger a armadura. Já no betão, a adição de inibidores catódicos atuará reprimindo as reações catódicas, além da utilização de aditivos minerais com ação pozolânica, tendo como objetivo aumentar a resistência mecânica e a durabilidade, reduzir porosidade e permeabilidade, diminuindo assim a penetração de cloretos. Na armadura com corrosão e perda de secção é proposto a substituição por aço inoxidável e, nas partes adjacentes, empregar proteção catódica seguida de inibidores de corrosão com nitrato de cálcio.

No betão submerso propõe-se executar com betão autoadensável e adicionar modificadores de viscosidade e anti-washout (VMA), para que não ocorra dispersão do betão ao entrar em contato com a água e não apresentar exsudação. Ao elaborar o betão

deve-se utilizar cimento de escória de alto-forno 70% com 10% de sílica ativa, relação $a/c \leq 0,40$. Na parte do recobrimento efetuar com 80 mm e, por final, realizar a prevenção catódica sob a forma de ânodos de sacrifício.

No bloco de coroamento que foi encontrado com rachaduras e deslocamentos, é sugerido reforçar executando encamisamento, adotando o betão autoadensável com $f_{ck} = 30$ MPa, e protensão externas com barras rígidas Dywidag para garantir maior durabilidade e eficiência na transferência e distribuição das cargas para a estrutura.

De um modo geral, nas fissuras apresentadas, primeiro será necessário investigar se são fissuras ativas ou passivas. Após o diagnóstico, as mesmas devem ser preenchidas com o material adequado. Nas fissuras ativas deve-se utilizar material elástico, não resistente pois ainda está em movimento. Nas fissuras passivas é indicado utilizar um material resistente e aderente, como resina epóxi.

Como foi observado no presente trabalho, é essencial conhecer o processo de diagnóstico das manifestações patológicas apresentadas, para que seja possível definir o tipo de intervenção que deve ser realizado para cada avaria observada, obtendo-se assim êxito e durabilidade nas estruturas. A proposta de solução de intervenção vai determinar os materiais utilizados e sua execução, após a análise cuidadosa dos dados obtidos a partir do estudo do mecanismo de degradação do betão e da armadura, bem como da influência do meio ambiente.

3 CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

3.1 Sumário e Conclusões

A compreensão dos principais mecanismos da degradação das estruturas de betão armado, em ambientes marítimos, é pressuposto básico para o correto diagnóstico das manifestações patológicas apresentadas e para a definição da manutenção corretiva apropriada.

A inspeção de pontes e viadutos, assim como a reabilitação e os reforços estruturais, é uma atividade que requer muito conhecimento nas áreas da engenharia e das ciências naturais, sendo fundamentais os conceitos de projeto, do comportamento estrutural, dos métodos construtivos, das propriedades dos materiais, da durabilidade das estruturas, dos requisitos funcionais, da execução e monitoramento, dos tipos de ensaios, do meio ambiente, e sua cercania. Percebe-se que, correntemente, o estado atual das pontes é consequência de uma má política de planeamento e conservação de obras públicas, devido à falta de um diagnóstico correto pelas empresas que são contratadas, as quais são selecionadas pelo menor orçamento.

Esta dissertação foi elaborada através de dois casos de estudo baseados nas pontes Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes, localizadas sobre o Rio Poxim na Avenida Beira Mar, cidade de Aracaju, do estado de Sergipe. A análise dos casos permitiu a obtenção de soluções de manutenção corretiva das duas pontes de betão armado com problemas de durabilidade, em consequência do surgimento de manifestações patológicas num curto espaço de tempo e antes do tempo previsto até a próxima manutenção corretiva.

Assim, mais concretamente, no **Capítulo 2** foram apresentadas causas e efetuado um levantamento de manifestações patológicas mais prováveis e decorrentes geralmente em pontes construídas em ambientes marítimos. Foi também realizado, através de uma revisão bibliográfica, um resumo de normas e técnicas, bem como uma proposta de

intervenção para cada processo de diagnóstico das manifestações patológicas, definindo a técnica e os materiais a serem utilizados, a partir dos estudos do histórico da estrutura, do seu meio ambiente e da manutenção corretiva realizada.

Observa-se que na manutenção corretiva existe, geralmente, mais do que uma técnica de recuperação ou reforço que podem ser adotadas. Porém, ainda se observa ausência de normas específicas que contemplem as inúmeras situações possíveis, principalmente devido: à complexidade do comportamento real das estruturas reforçadas ou recuperadas, à metodologia, aos materiais utilizados, ao diagnóstico correto das manifestações patológicas, assim como à conjugação de fatores, como a urgência de uma manutenção corretiva duradoura.

No **Capítulo 3** foram colocadas duas pontes como casos de estudo e como exemplos de aplicação de manutenção corretiva ineficaz, aplicada sem conhecer o mecanismo de deterioração dos materiais e da estrutura. Em função identificação do correto diagnóstico das manifestações patológicas, procedeu-se à elaboração de uma proposta de intervenção.

Com base no levantamento histórico do trabalho realizado nas duas pontes de betão armado construídas em ambientes marítimos, ficou evidente que as deteriorações das estruturas são naturalmente causadas pelos mesmos tipos de mecanismos.

As avarias identificadas nas duas pontes, mais frequentes e preocupantes, foram as seguintes:

- Corrosão das armaduras;
- Lixiviação;
- Eflorescência;
- Manchas de infiltração;
- Fissuras;

- Erosão no bloco de coroamento.

Através da análise dos dois casos de estudo, foi então possível extrair um conjunto de lições de intervenção que pretendem estabelecer critérios que possam aperfeiçoar o planeamento e execução das manutenções corretivas de pontes que foram construídas em ambientes marítimos, possibilitando ampliar significativamente a vida útil das mesmas. Assim, mais especificamente, em função das manifestações patológicas precoces foi possível extrair as seguintes lições:

- Antes de qualquer manutenção corretiva de obra de arte especial, deve-se realizar uma análise e definição minuciosa sobre um conjunto de parâmetros ligados à durabilidade, que determinam o comportamento do betão frente a diferentes agressões;
- Não se pode desconsiderar a influência do meio ambiente sobre a estrutura de betão armado, pois este provoca mudanças nas propriedades do betão. Assim, é necessário a realização de estudos antes da manutenção corretiva, que levem em consideração o impacto do meio ambiente e observar as suas peculiaridades, para entender os fatores relevantes na degradação da estrutura e, assim, apresentar propostas de intervenção, obtendo êxito na sua durabilidade e desempenho, evitando manifestação patológica em tempo reduzido.
- A partir da informação disponível, incluindo inspeções visuais, é preciso diagnosticar e avaliar as manifestações patológicas apresentadas, ou seja, fazer um estudo histórico da estrutura e do seu meio ambiente e, assim, elaborar as propostas de intervenções apropriadas para cada avaria.

Observou-se ainda que os parâmetros mais importantes a considerar antes da manutenção corretiva são:

- Composição química e mineralógica do cimento, adições minerais, a natureza dos agregados e os aditivos;
- O meio ambiente e seus agentes agressivos, sendo de natureza física (líquido, gasoso ou sólido) e de natureza química (dissolução, hidrólise e lixiviação);
- Os ciclos climáticos de humedecimento e secagem das estruturas, que aceleram consideravelmente a degradação, como por exemplo a zona de maré em meio marítimo pois é a zona na qual o risco de dano é o máximo;
- A temperatura, pois é geralmente um fator de aceleração das reações, e a humidade relativa do meio ambiente;
- Esforços mecânicos associados ao funcionamento da estrutura, como carregamentos, fadiga, dilatações e retrações diferenciais, podendo gerar fissuras que convém serem diferentes das ocasionadas por agentes agressivos, facilitando ataques químicos e enfraquecendo a estrutura;
- Por último, parâmetros econômicos, com restrições econômicas locais, que impõem muitas vezes a escolha dos materiais inadequados, não otimizados no que diz respeito a durabilidade.

Finalmente, note-se que o betão armado utilizado na manutenção corretiva precisa ser de altíssima qualidade, tendo em atenção recobrimento corretos, adequados fatores a/c, assim como aglomerantes, tipos de aditivos e proteção bem definida da superfície do betão. Adicionalmente, para evitar a repetição de reparações ineficazes, sugere-se a criação de cursos de formação para aumentar os níveis de qualificação da equipa técnica para realizar vistorias e operar o sistema de gestão de projetos, materiais e execução de uma manutenção corretiva. Além disso, falta comprometimento e obrigatoriedade entre os órgãos competentes, de aplicar um sistema cronológico de inspeção e manutenção em cada ponte e viaduto, com o objetivo de diminuir o surgimento

de manifestações patológicas, de modo a reduzir maiores gastos ao estado, preservar as estruturas e a vida dos habitantes locais.

3.2 Desenvolvimentos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- A criação de banco de dados ou contribuições para entidades como ABNT, IBRACON, IBAPE e manuais de manutenção em pontes e viadutos DNIT, com orientações de projetos, materiais e execução, após a identificação e análise minuciosa das manifestações patológicas, facilitando as intervenções de manutenção corretiva com o intuito de preservar a durabilidade e desempenho estrutural;
- Verificação da influência do ambiente com a intensidade das manifestações patológicas e análise dos materiais e métodos, que serão realizados na manutenção corretiva, sendo claro que existem interações sobre o meio ambiente agressivo e o betão armado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] LOURENÇO, L. C.; ALVES, V. R.; JORDY, J. C.; MENDES, L. C.; LOURENÇO, M. V. C. *Parâmetros de Avaliação de Patologias em Obras de arte Especiais*. Disponível em: http://www.civil.uminho.pt/revista/n34/Pag_5-14.pdf. Acesso em: 12 de junho de 2012.
- [2] SARTORTI, A. L. *Identificação de patologias em pontes de vias urbanas e rurais no município de Campinas-SP*. Campinas, 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.
- [3] CALLEJA, M. - *Durability of Concrete*. In: Intl. Cong. Chem. Cem., 7th. Paris, 1980 – Future Trends in the research of the Structure, Properties and Behaviour of Blended Cements. In: Intl. Cong. Chem. Cem, 8th. Rio de Janeiro, 1986.
- [4] JOHN, V. M- *Avaliação da durabilidade de Materiais, Componentes e Edificações: Emprego do Índice de Degradação*. Porto Alegre, 1987. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [5] NEPOMUCENO, A. A. *Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto*. In: ISAIA, G.C (Ed). *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações 1*. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 793- 827.
- [6] GOUVEIA, J. C. M. *Degradação do betão por fenômenos de carbonatação: Armaduras das edificações após 50 anos na cidade de Lisboa*. 2010, 113-F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- [7] ODRIOZOLA, M. A. B. *Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de nareas y zona sumergida*. 2007, 544 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escuela Técnica de Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Pueros, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2007.
- [8] ABNT, 2003. NBR 6118 – *Projetos de Estruturas de Concreto*. Rio de Janeiro. Brasil
- [9] P.J.S CRUZ, R. CALÇADA e T. MENDONÇA – *Segurança, Conservação e Reabilitação de Pontes*. 2013. Associação Portuguesa para Segurança e Conservação de Pontes.
- [10] NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. Ed. Pini, São Paulo, 1997
- [11] PEREPÉREZ, B; BARBERÁ, E.; ANDRADE, C. *La Agressividade Ambiental y la Durabilidad de las Estructuras de Hormigón*. Informes de la Construcción. v. 38, nº 388, 1987, p. 17-24.
- [12] MOURA, Daniela da Silveira; outubro 2012. *“Deterioração e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado”*. Mestrado em Tecnologias e Gestão das Construções; Instituto Superior de Engenharia do Porto; Instituto Politécnico do Porto; Porto.
- [13] SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*. São Paulo: Pini, 1998, pg. 255.
- [14] KLIMPEL, Eliete do Carmo; SANTOS, Patricia Renée da Cruz. *Levantamento das manifestações patológicas presentes em unidades do conjunto habitacional Moradias Monteiro Lobato*. 2010. 98f. Trabalho de conclusão de curso (Especialista em Patologia nas obras civis) - Instituto IDD, Curitiba, 2010.
- [15] KRÜGER, J. A.; MOREIRA, L. DOS P.; BRIK, E. M. J. *Estudo das patologias em estruturas de concreto provenientes de erros em ensaios e em procedimentos executivos*. In: 8º Encontro de engenharia e tecnologia dos campos gerais, 2013, disponível em: <http://docplayer.com.br/2014101-Estudo-das-patologias-em-estruturas-de-concreto-provenientes-de-erros-em-ensaios-e-em-procedimentos-executivos.html>
- [16] COSTA, V. M. *Desempenho e Reabilitação de Pontes Rodoviárias: Aplicação a Casos de Estudo*. Dissertação (Mestrado), Universidade de Minho, Braga, 2009.
- [17] VITÓRIO, J. A. P. – *Avaliação do Grau de Risco Estrutural de Pontes Rodoviárias de Concreto* – Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008.

- [18] MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Monteiro. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3ª Edição. São Paulo: Editora IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto, 2008.
- [19] THOMAZ, Eduardo C. S. *Ataque de Sulfatos ao Concreto de Cimento Portland*. Notas de Aula - Instituto Militar de Engenharia. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimentos.htm>. Acesso em: 30/05/2016.
- [20] MEDEIROS, Marcelo H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, Paulo. *Durabilidade e Vida Útil das estruturas de Concreto*. In: Geraldo Isaia. (Org.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1 ed. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 773-808, 2011.
- [21] ACI 201.2R. 2009, *Manual of Concrete Practice*. Parte 1.
- [22] BERTOLINI, L. *Materiais de construção*. São Paulo: Oficina de texto. 2010.
- [23] ABNT, 2015. NBR 12655 – *Concreto de cimento Portland*. Rio de Janeiro. Brasil
- [24] NF P 15-317 ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, AFNOR NF, Aglutinantes Hidráulicos – Cimentos para local marítimo. P15-317 (2006).
- [25] DNIT – Manual de Recuperação de Pontes e Viadutos Rodoviários, IPR. Pub., 744, Rio de Janeiro, 2010.
- [26] BROOMFIELD, John P. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*. London and New York. E & FN SPON, 1997.
- [27] HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armadura de concreto armado*. Tese (Livre docência), 231 f, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [28] ANDRADE, C. *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Tradução de Antônio Carmona Filho e Paulo Roberto do Lago Helene. São Paulo: Pini, 1992.
- [29] SILVA, C. A. *Comportamento dos Perfis de Cloreto em Tetrápodes localizados nos Molhes da Barra (Rio Grande – RS – Brasil)*. 2010, 287-f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.
- [30] EMMONS, Peter H. *Concrete repair and maintenance illustrated*. Inc. R. S. Means Company, Kingston, 1994.
- [31] GONZÁLEZ, J. A.; MIRANDA, J. M.; FELIU, S. *Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete*. *Corrosion Science*, v. 46, 2004.
- [32] LAPA, J. S. *Patologia, Recuperação E Reparo Das Estruturas De Concreto*. Monografia, Especialização em Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [33] LIMA, M. G.; MORELLI, F. *Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto*. São José dos Campos, 2004.
- [34] AGUIAR, J. E. *Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis*. 2006, 173 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- [35] ANDRADE, T. *Tópicos sobre a durabilidade do concreto*. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). *Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, p.753-792.
- [36] FUSCO, P. B. *Tecnologia do Concreto Estrutural*. 2ª Ed. PINI, 2008.
- [37] ANDRADE, T.; SILVA, A.J.C. *Patologia das Estruturas*. In: ISAIA, Geraldo Cechella. (Ed) *Concreto: In.: Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. Editor: Geraldo Cechella Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005, V.1, Cap. 32.

- [38] HADDAD, M.; DONADIO, M. *Proteção das armaduras com inibidores químicos de corrosão*. Revista Concreto e Construções. São Paulo. n49. p. 34 – 41. Mar. 2008.
- [39] SOUZA, KAREN NUNES DE. *Estudo experimental e probabilístico da vida útil de estruturas de concreto armado situadas em ambiente marítimo: influência do grau de saturação do concreto sobre a difusividade de cloretos*. 2005. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2005.
- [40] CARDOSO, R. A. F. *Infraescavação em pilares de pontes*. Dissertação de Mestrado na Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.
- [41] BRANDÃO, S. F. *Manifestação Patológica em Pontes da Cidade de Sobral – Ce*. Congresso Internacional sobre Patologia y Recuperación de Estructuras – CINPAR. At: Santiago de Chile, 2014.
- [42] CÁNOVAS, M. F. *Patologia e Terapia do Concreto Armado*. 1 Ed. Tradução de M. C. Marcondes; C. W. F. dos Santos; B. Cannabrava. São Paulo: Ed. Pini, 1988. 522 p.
- [43] LANER, F. J. *Manifestações Patológicas nos Viadutos, Pontes e Passarelas do Município de Porto Alegre*. Porto Alegre, 2001.
- [44] CARMONA, F. A. *Curso Prático de Diagnóstico, Reparo, Reforço e Proteção de Edificações em Concreto*. São Paulo: Abece, 2005.
- [45] CASCUDO, O. *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. São Paulo: Goiânia, GO: PINI, Editora UFG, 1997. 237p ISBN 8572660801 (Pini).
- [46] POLITO, Giulliano. *Corrosão em estruturas de concreto armado: Causas, mecanismo, prevenção e recuperação*. Monografia (Aperfeiçoamento / Especialização), Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- [47] FUNDATEC, Relatório de Inspeção de Obra de arte do Município de Porto Alegre – Pontes. Relatório Geral do LEME. (Convênio PMPA / FUNDATEC), Porto Alegre, 1993.
- [48] JATOBETON, E. *Informativo Técnico e Fotográficos de Serviços de Engenharia Realizados nas Pontes sobre o Rio Poxim na Cidade de Aracaju- Sergipe*. 2015.
- [49] MOREIRA, Fotos. *Imagens das Pontes de Aracaju Juscelino Kubitschek e Paulo Barreto Menezes*. 2019
- [50] CEHOP – Companhia Estadual de Obras Públicas e Habitações de Sergipe. *Parecer de Vistoria Técnica – Inspeção Visual Extraordinária*. Processo Judicial, n. 201310300282. 2008.
- [51] BIJEN, J. *Blast Furnace Slag For Durable Marine Structures*. VNC/ BetonPrisma,, Hertogenbosch, 1998.
- [52] NORME NF EN 197 – 1, *Ciment. Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*, Février 2001.
- [53] NORMA DNIT 082 / 2006 - *Furos no concreto para ancoragem de armaduras - Especificação de serviços*. IPR. Pub., Rio de Janeiro, 2006.
- [54] RIZKALLA, S., LABOSSIERE, P. *Structural Engineering with FRP – In Canada*. Concrete International – The Magazine of the American Concrete Institute, Farmington Hills, v. 21, n. 10, p. 25-28, Oct.1999.
- [55] TAERWE, L. R., MATTHYS, S. *FRP for Concrete Construction: Activities in Europe*. Concrete International – The Magazine of the American Concrete Institute, Farmington Hills, v. 21, n. 10, p. 33-36, Oct.1999.
- [56] ANDRADE, C. *Some Laboratory Experiments on the Inhibitor Effect of Sodium Nitrite on Reinforcement Corrosion*. Cement and Concrete Aggregate, 8(2), 110-116. (1986).

[57] GAIDIS, J. M., and Rosenberg, A. M. *The Inhibition of Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete by Use of Calcium Nitrite*. Cement and Concrete Aggregate, 9(1), 30-33. (1987).