



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JUAN LUÍS GOMES IBIAPINA

**DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM
AMBIENTES COM ELEVADA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS**

FORTALEZA
2019

JUAN LUÍS GOMES IBIAPINA

DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM
AMBIENTES COM ELEVADA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- I21d Ibiapina, Juan Luís Gomes.
Durabilidade de estruturas de concreto armado em ambientes com elevada concentração de cloretos / Juan Luís Gomes Ibiapina. – 2019.
75 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota.

1. Durabilidade. 2. Cloretos. 3. Concreto armado. 4. Recuperação de estruturas. I. Título.

CDD 620

JUAN LUÍS GOMES IBIAPINA

DURABILIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM
AMBIENTES COM ELEVADA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS

Projeto de Graduação apresentado
ao Departamento de Engenharia
Estrutural e Construção Civil da
Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Magnólia Maria Campêlo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, José Gomes Ibiapina
e Maria De Jesus.

AGRADECIMENTOS

Ao final deste trabalho, gostaria de agradecer aqueles que contribuíram com a realização deste momento. Não consigo, nem penso que poderia citar nomes de acordo com a importância para o trabalho, portanto prefiro fazer de forma cronológica, de acordo com que essas pessoas foram surgindo na minha vida.

Primeiramente aos meus pais, a razão de tudo, Maria de Jesus Gomes Ibiapina e ao meu falecido pai José Gomes Ibiapina, que sempre me guiaram nos estudos, na vida, sempre estiveram dispostos a me ajudar, mesmo de longe e que me aturaram tanto nos momentos de estresse. Concluir essa etapa é, talvez, o mínimo que posso fazer por eles.

Aos meus irmãos, Filho, Vinícius e Maria Lícia, pela companhia e pelas brincadeiras, sempre quebrando a seriedade.

Aos meus queridos amigos do Cariri, que tornaram esse ciclo mais divertido com as incontáveis madrugadas de estudos e risadas.

Aos meus tios amados, que sempre aparecem em boa hora.

A Sofia, que contribuiu com sua opinião e carinho.

“A condição natural dos corpos não
é o repouso, mas o movimento.”

Galileu Galilei

RESUMO

Após o desenvolvimento de materiais resistentes a esforços, a questão da durabilidade tem ganhado força nos últimos anos, já que antes mesmo de atingir a vida útil de projeto as estruturas já se mostram deterioradas. O trabalho revê as condições ambientais de Fortaleza que propiciam o ataque por cloretos e reúne recomendações para o projeto e recuperação de estruturas de concreto armado atacadas por cloretos. O estudo foi baseado a partir da revisão bibliográfica das contribuições de pesquisas de vários autores que dissertaram acerca de cada tema abordado, de maneira a contribuir com a disseminação do conhecimento entre os profissionais de engenharia.

Palavras-chave: durabilidade, recuperação, concreto armado, cloretos.

ABSTRACT

After the development of resistant materials the durability subject has had more attention nowadays. Even before the concrete structures reach the limit they are very damaged. This assignment reviews the aggressivity condition of environment of Fortaleza which provides the conditions for the chloride attack and assemble recommendations for design and recovery of reinforced concrete structures under chloride influences. The study was a bibliografic review from many researches of several researchers who wrote about each subject that were explained in this assignment. The objective is to spread the knowledge for civil engineers.

Keywords: durability, repair, chloride, reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Manifestação típica em vigas	20
Figura 2 – Manifestação típica em lajes	21
Figura 3 – Manifestação típica em pilares	21
Figura 4 - Vida útil das estruturas.....	26
Figura 5– Esforços produzidos pela expansão do aço que levam à fissuração e destacamento do concreto, pela corrosão das armaduras.....	28
Figura 6 - Efeito da relação água cimento na dimensão dos poros no concreto com cimento Portland puro.....	31
Figura 7 - Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com a relação água/aglomerante de 0,45	32
Figura 8- Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com a relação água/aglomerante de 0,38	33
Figura 9 - Efeito da escória de alto-forno na difusividade do cloreto no concreto pelo método RCM	33
Figura 10 - Degradação de estrutura de concreto pela a corrosão do aço	29
Figura 11 – Esquema da concentração com a velocidade do vento	38
Figura 12 – Proposta de classificação de classe de agressividade ambiental de acordo com Vilasboas (2013).....	42
Figura13 – Proposta de classificação de classe de agressividade ambiental de acordo com Meira et al. (2010).....	42
Figura 14- Evolução dos custos de intervenção nas fases da vida da estrutura	45
Figura 15 –Erro de detalhamento que favorece o aparecimento de fissuras ...	46
Figura 16– Inadequação ao ambiente que possibilita a desagregação do concreto	47
Figura 17 – Gráfico resistência à compressão x relação a/c.....	48
Figura 18 – Vazios de concretagem em uma laje causada por problemas no adensamento e traço do cimento	49
Figura 19 – Representação dos diferentes tipos de proteção superficial do concreto	50
Figura 20 – Projeto de estrutura pré-fabricada.....	52
Figura 21 – Ilustração do funcionamento do sistema de proteção catódica por corrente impressa.....	56

Figura 22 – Jateamento de ar comprimido para a remoção de pó	59
Figura 23 - Utilização da técnica do concreto projetado.....	60
Figura 24 – Delimitação da área de reparo e execução do serviço em pequenas profundidades.....	60
Figura 25– Representação de procedimento para reparos superficiais em grandes áreas	61
Figura 26 - Representação de procedimento para reparos superficiais com concreto projetado.....	62
Figura 27 – Corte recomendado além da armadura para garantir ambiente alcalino para o aço	64
Figura 28 – Restituição da seção original de aço adicionando-se novas barras	65
Figura 29– Emenda por solda aceitável e a recomendada	66
Figura 30 – Emenda entre as barras remanescentes e as complementares ...	66
Figura 31– Pequena inclinação das barras são recomendadas para a mobilização contributiva do concreto envolvente	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Velocidade crítica adotada pelos autores consultados.	39
Quadro 2 - Quadro resumo dos procedimentos para preparo do substrato	57
Quadro 3 - Quadro resumo dos procedimentos para preparo do substrato	58
Quadro 4 – Possibilidades de reparos profundos a depender dos materiais escolhidos	63

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação envolvida no processo de corrosão - Zona anódica: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	25
Equação 2 - Equação envolvida no processo de corrosão - Zona catódica: $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH}^-)$	25
Equação 3 - Equação envolvida no processo de corrosão - Zona intermediária: $\text{Fe}^{2+} + 2(\text{OH}^-) \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	26
Equação 4 - Equação envolvida no processo de corrosão - Formação do hidróxido férrico: $2\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3$	26
Equação 5 – Equação 2° Lei de Fick– $C(x, t) = C_s[\text{erfc}(\frac{x}{\sqrt{4tD}})]$	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CEB	Comité Euro-Internacional du Béton
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NBR	Norma brasileira registrada
NBR 15575:2013	Norma Brasileira referente a Edificações Habitacionais
NBR 6118:2014	Norma Brasileira referente ao Projeto de estruturas de concreto
RCM	Ensaio de migração rápida de cloreto

LISTA DE SÍMBOLOS

\varnothing	Diâmetro
A_s	Área de aço
$A_{s,corr}$	Área de aço corroída
$A_{s,ref}$	Área de aço de reforço
L_b	Comprimento de ancoragem
L_e	Comprimento de ancoragem equivalente

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1.1 Introdução	18
1.2 Problema de pesquisa	22
1.3 Justificativa	22
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo Geral	23
1.4.2 Objetivos Específicos	23
1.5 Estruturação Do Trabalho	23
CAPÍTULO 2	25
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Vida útil e durabilidade	25
2.1.1 Ataque de Cloretos	26
2.1.2 Avaliação do grau de deterioração.	28
2.1.3 Requisitos de projeto para durabilidade.	30
2.1.4 Método de recuperação.	34
CAPÍTULO 3	36
Agressividade por cloreto na cidade de Fortaleza	36
3.1 Aspectos gerais	36
3.2 Temperatura	37
3.3 Umidade	38
3.4 Velocidade dos ventos	38
3.5 Distância do mar	39
3.6 Considerações das normas ABNT 6118:2014 e ABNT NBR 15575:2013	40
3.7 Climatologia de Fortaleza	41

CAPÍTULO 4	44
Recomendações para o projeto e recuperação de estruturas	44
4.1 Aspectos gerais	44
4.2 Recomendações para o projeto	46
4.2.1 Relação água/cimento e grau de hidratação	47
4.2.2 Tipos de cimento	48
4.2.3 Processos construtivos	48
4.2.4 Elaboração de manual	49
4.2.5 Proteção do concreto	50
4.2.6 Inibidores de corrosão	51
4.2.7 Pré-fabricação	52
4.3 Recuperação de estruturas atacadas por cloretos	52
4.3.1 Estratégias de intervenção	53
4.3.2 Sistemas de reparo atuantes sobre o concreto	54
4.3.3 Sistemas de reparo atuantes sobre a armadura	55
4.3.4 Procedimentos	56
CAPÍTULO 5	68
5.1 Conclusões	68
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	70
5.3 Referências Bibliográficas	71

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

Em construções antigas, o concreto apresenta baixa resistência mecânica, sendo um dos principais motivos para a grande massa e o alto momento de inércia das peças, tanto devido ao conhecimento mais limitado da época sobre a tecnologia do concreto, quanto aos elevados coeficientes de segurança. O ponto positivo era que devido ao maior porte das peças, algumas possuíam uma maior resistência aos processos de degradação, principalmente as estruturas com grandes cobrimentos.

Gjørv (2015) relata que, com o desenvolvimento da mistura de cimento Portland, como também de novos aditivos, tanto orgânicos quanto minerais, foi possível aprimorar a mistura do concreto. Com isso atendeu-se aos requisitos de resistência à compressão com uma menor quantidade de cimento, provocando uma redução nas dimensões das peças. Esse fator aliado à grande variação da qualidade de execução das obras abriu espaço para um maior índice de patologias.

Metha e Monteiro (1994) afirmam que, de modo crescente, a durabilidade está sendo compreendida com a mesma cautela que as propriedades mecânica e custo inicial, visto que os gastos devidos aos reparos têm se tornado muito elevados, considerando o custo global da obra. Tal situação força a conscientização dos engenheiros no projeto de obras duráveis, portanto mais sustentáveis.

Para Neville (1997) a durabilidade inadequada é evidenciada por uma degradação que pode ser iniciada por fatores externos ou causas internas no próprio concreto. As formas de ação podem ser divididas em físicas, químicas e mecânicas. As causas físicas abrangem os efeitos de diferença de temperatura e diferentes coeficientes de dilatação térmica entre o cimento e o agregado. As químicas abrangem reações álcali-carbonato e álcali-sílica. Ataques químicos externos ocorrem pelas ações de sulfatos e íons como o cloreto, que será estudado neste trabalho. A degradação mecânica pode se dar por impactos, abrasão ou cavitação.

Ao longo do tempo surgiu a necessidade de adequação às novas culturas de qualidade. O estabelecimento do bom desempenho como uma

condição de satisfação dos clientes e a ausência de defeitos se tornaram uma tática para redução do custo global da obra. Desse modo a NBR 15575, tratou de organizar e formalizar os requisitos de desempenho para edificações habitacionais, de forma a inserir não só as exigências dos usuários ao conforto, como também a durabilidade, as informações do uso e manutenção.

A NBR 6118:2014 faz considerações sobre algumas exigências para a durabilidade de estruturas. As interações estrutura-ambiente são abordadas em vida útil de projeto, mecanismos de envelhecimento e deterioração e agressividade ambiental. Os mecanismos de envelhecimento tratados são relativos ao concreto e à armadura, dentre os quais está o ataque por cloretos.

Nesse contexto, a agressividade do ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, e são independentes das ações que previstas no dimensionamento das estruturas, como as mecânicas e as variações volumétricas inerentes ao material.

Com isso, o código modelo MC-90 (CEB-FIP-1991) deixa claro que as estruturas de concreto armado precisam ser projetadas, construídas e utilizadas de uma maneira que, sob a influência das condições ambientais, elas mantenham sua segurança, funcionalidade e estética por um período de tempo mínimo previamente determinado, sem requisitar altos custos de manutenção e reparo. Além disso, é evidenciado que o processo que engloba a criação e a manutenção de estruturas precisa da cooperação de quatro atores envolvidos no processo. São eles o proprietário que define as demandas referentes à edificação, o projetista que planeja as especificações de projeto e as medidas para o controle de qualidade, o construtor que segue as diretrizes de projeto e os usuários que realizam as manutenções durante o período de uso.

Por consequência, o estudo da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes agressivos se torna indispensável para mitigar as consequências dos atores patológicos inerentes ao ambiente. Muitas capitais brasileiras se encontram no ambiente litorâneo agressivo. Segundo a literatura mais recente, Albuquerque e Otoch (2005), Campos (2016) e Portella (2013), Fortaleza aparece com um grande destaque no quesito agressividade do ar atmosférico,

tendo em vista as altas concentrações de íons de cloro, velocidades dos ventos, temperaturas e umidades ao longo de todo o ano.

As estruturas mais robustas como pontes, portos e estruturas “off-shore” tem os seus mecanismos de deterioração muito controlados e os planos de manutenção bem definidos, pois a paralização do uso da estrutura para a execução de manutenções ocasiona, muitas vezes, perdas econômicas irreparáveis. Estruturas nesses ambientes já desmistificaram o pensamento que o concreto é infinitamente durável, o qual ainda não está bem difundido no processo de construção e manutenção das edificações usuais de concreto.

Para o reestabelecimento das condições iniciais das estruturas degradadas devido às agressões dos íons cloreto, surge a recuperação de estruturas, que aborda a determinação da capacidade resistente residual, as técnicas e os materiais utilizados no processo, ramo que está em constante desenvolvimento, tendo em vista os seus altos custos.

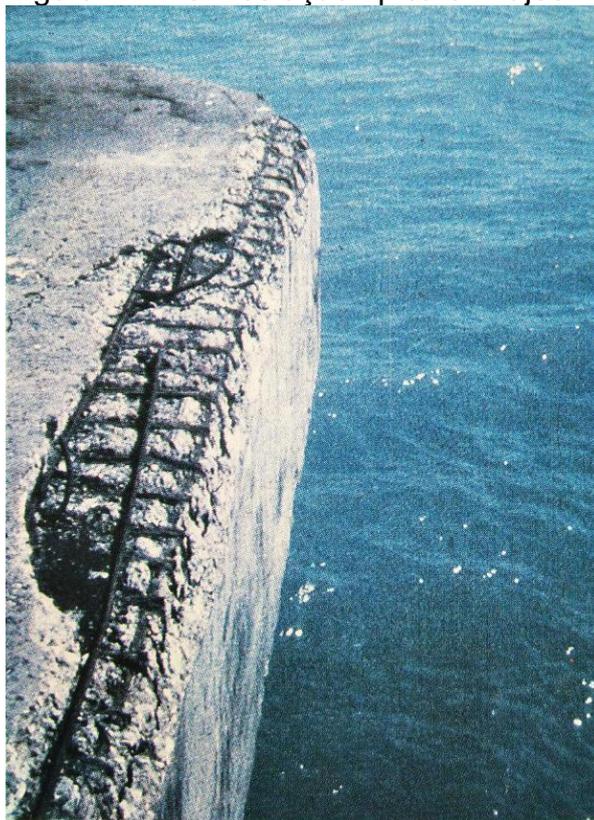
O ataque de cloretos à estrutura gera elevados gastos com manutenção, a ponto de custar aos cofres públicos cerca de R\$ 800 milhões anuais. Estruturas deterioradas por esse ator são relativamente comuns no litoral brasileiro. As Figuras 1 à 3 ilustram as manifestações mais comuns em vigas, pilares e lajes.

Figura 1 – Manifestação típica em vigas



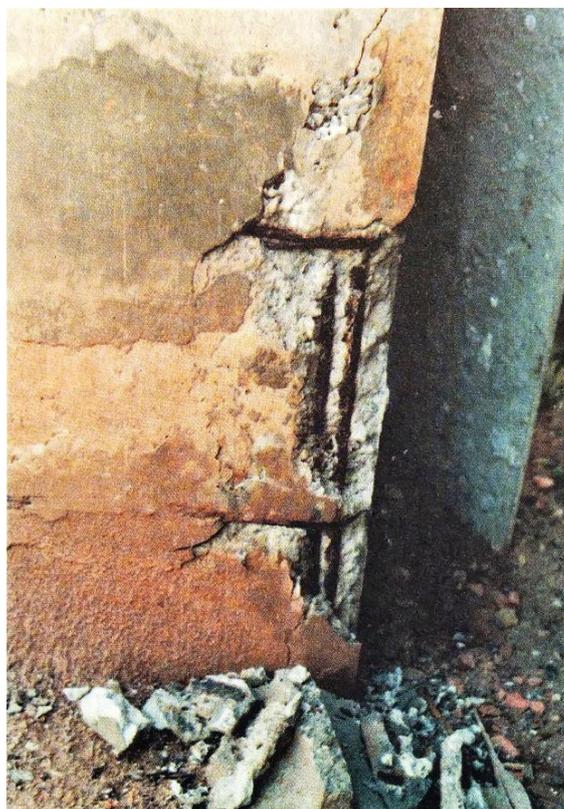
Fonte: Cimentos Itambé

Figura 2 – Manifestação típica em lajes



Fonte: Helene (1992)

Figura 3 – Manifestação típica em pilares



Fonte: Helene (1992)

1.2 Problema de pesquisa

Para o projeto de estruturas de concreto armado, a NBR 6118:2014 trata com subjetividade a agressividade dos ambientes em que as estruturas estarão localizadas. Nesse contexto, o desenvolvimento técnico está bem à frente do que é disposto nas normas, já que, com a evolução das tecnologias dos materiais constituintes do concreto, foi avaliado com maior precisão o ganho de resistência, sem levar tanto em conta a durabilidade, principalmente em ambientes agressivos.

Para o cálculo de reforços, a NBR 6118:2014 não possui qualquer orientação, e, por esse motivo, os projetos de reforços são feitos baseados na experiência do engenheiro projetista.

Devido ao elevado custo já elucidado, a deterioração prematura devido ao ataque por cloretos é um dos principais vilões do custo global da obra, principalmente pelo descaso com as inspeções e as manifestações patológicas, sendo executados simples reparos ou recuperações que não são condizentes com a real necessidade da estrutura.

1.3 Justificativa

A importância do estudo se dá com a necessidade de divulgação das soluções para obras em ambientes com altas concentrações de cloreto, em diversas etapas da vida da estrutura, elucidando a evolução dos custos de reparo.

Processos de deterioração, como ataques químicos, ainda se caracterizam como um grande desafio, além de ameaçarem muitas estruturas de concreto. Autores como Gjrv (2015) e Andrade (1997) citam o que aparenta ser a mais grave ameaça à durabilidade e ao desempenho de muitas estruturas de concreto: a corrosão das armaduras devido ao ataque por cloretos.

Com o progresso das tecnologias dos constituintes do concreto, conseguiu-se atingir resistências maiores com um menor consumo de cimento, contudo a durabilidade foi seriamente afetada, tanto por erros construtivos, como de projeto e de materiais mal especificados, o que evidencia a necessidade de intervenções muito antes de chegar na vida útil de projeto, o que onera o custo

global da obra. Para as estruturas de concreto que contém cloreto, a penetração desse ânion ainda constitui um obstáculo, mesmo nos dias atuais.

Segundo Silva Filho (1994), o concreto sempre possibilitou a obtenção de estruturas com grande vida útil, comprovadamente na prática. Entretanto, o número de estruturas de concreto que sofreram deterioração prematuras é elevado, o que releva a importância de pesquisas na área.

Portanto, o presente estudo justifica-se pela importância de se analisar o principal ator de corrosão de armaduras em regiões litorâneas, o cloreto, e expor soluções para o tratamento de estruturas já danificadas, além de reunir recomendações para o projeto de estruturas inseridas nesses ambientes.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse estudo é apresentar um roteiro para a elaboração do projeto e de recuperação de estruturas de concreto armado inseridas em ambientes com elevada concentração de cloretos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar os conceitos de vida útil e durabilidade das estruturas;
- b) Apresentar o mecanismo de deterioração do concreto armado sob o ataque de cloretos;
- c) Apresentar métodos para avaliação do grau de deterioração da estrutura;
- d) Apresentar recomendações de projeto para garantir a durabilidade de estruturas de concreto armado em ambientes com elevada concentração de cloretos; e
- e) Apresentar métodos de recuperação da estrutura de concreto armado deteriorada por ataque de cloretos.

1.5 Estruturação Do Trabalho

O texto a seguir é composto das seguintes partes:

Capítulo 1 – Introdução do trabalho, envolvendo a justificativa, objetivo geral e objetivos específicos.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica. Serão abordadas parte da literatura existente que tratam sobre: vida útil e durabilidade, ataque de cloretos, requisitos de projeto para durabilidade, avaliação do grau de deterioração e os métodos de recuperação.

Capítulo 3 – Agressividade por cloreto na cidade de Fortaleza. Será tratada a importância do estudo das condições ambientais do local da construção das estruturas. Características do ambiente que influenciam a penetração dos cloretos, como umidade, temperatura, velocidade dos ventos e distância para o mar e serão feitos comentários sobre uma proposta de classificação de agressividade da atmosfera de fortaleza

Capítulo 4 – Recomendações para o projeto e recuperação de estruturas de concreto armado em Fortaleza. Serão expostos procedimentos e técnicas mais discutidos na literatura para o projeto e a recuperação de estruturas em ambientes com alta concentração de cloretos.

Capítulo 5 – Conclusões. Finalmente, serão apresentadas as conclusões finais do estudo, mostrando o intuito e o propósito que motivaram a elaboração deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vida útil e durabilidade

A questão da durabilidade tem cada vez mais enfoque, e parte disso se deve ao fato de que os custos de reparo e reforço são cada vez mais elevados. Outra parte pode ser atribuída à crescente atenção não só aos custos iniciais, como também aos custos do ciclo de vida.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), longa vida útil é sinônimo de durabilidade, sendo sua variação o resultado de interações do ambiente com os materiais, visto que alteram tanto a microestrutura quanto as propriedades ao longo do tempo. Existem diversos conceitos de durabilidade, o apresentado pelo CEB – FIB MC-90 (1991) apresenta uma definição mais geral, segundo o código, as estruturas devem satisfazer critérios de projetos, execução e utilização, para que sob condições ambientais já conhecidas, mantenham-se seguras, esteticamente e funcionalmente aceitáveis. Já em Helene (1997), esse conceito é dividido em várias etapas, descritas abaixo.

A primeira designa o período de tempo em que é dada a penetração dos agentes agressivos até a despassivação da armadura, e é nomeada de período de iniciação. Associa-se esse período de tempo à denominada vida útil de projeto. Esse período é tomado como segurança, pois o fato da frente de cloretos atingir a armadura não significa uma corrosão excessiva, mas que foi dado o início da corrosão, processo que é mais notório.

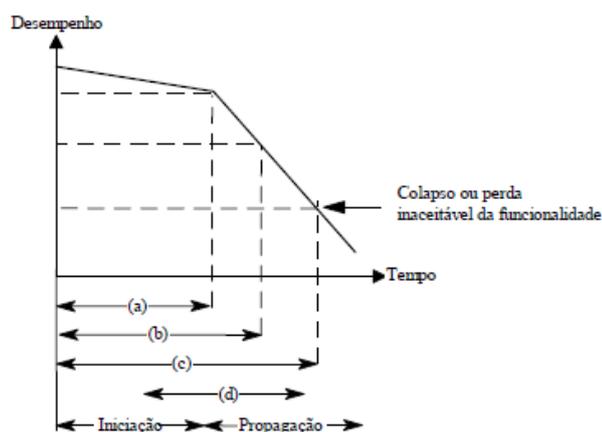
Já na segunda, o período em que se dá o aparecimento de manchas, fissuras ou até destacamento da superfície do concreto, o qual pode chegar até o limite do cobrimento, é denominado vida útil de utilização.

No que tange à terceira, tem-se o período em que se dá a ruptura ou a falha parcial ou total da estrutura. Associa-se a esse período a vida última ou total. Relaciona-se ao período de tempo em que há uma grande redução da seção resistente da armadura ou uma redução da aderência entre armadura/concreto, o que provoca o colapso parcial ou total da estrutura.

Finalmente, na quarta etapa é destacada a vida útil residual, período em que a estrutura ainda é capaz de desenvolver suas funções. Este período é contado a partir de uma vistoria ou possível intervenção na estrutura, a qual pode ser efetuada em qualquer instante da vida de utilização da estrutura. Ela pode ser dividida ainda em três tipos de vidas úteis residuais, que dependem do momento da vistoria, uma mais curta, contada até o momento em que a armadura é despassivada, outra no aparecimento de manchas, fissuras ou deslocamento do concreto e a última mais longa, que é contada até a perda significativa da capacidade resistente do elemento estrutural.

A Figura 4 apresenta um gráfico esquemático das etapas descritas.

Figura 4 - Vida útil das estruturas



Fonte: CEB e HELENE (1993, com adaptações)

2.1.1 Ataque de Cloretos

Segundo Cánovas (1988), as ações de tipo químico são as que produzem maior dano. Deterioração por águas salinas são responsáveis por um gasto expressivo em reparação de estruturas de concreto armado ao longo dos anos, dado que elas destroem por dissolução ou por transformação dos constituintes do cimento em sais solúveis que são removidos por lixiviação, ou pela produção de compostos expansivos.

No entanto, pesquisadores como Neville (1997) e Metha e Monteiro (1994) esclarecem que a deterioração tanto do concreto que acomodam metais,

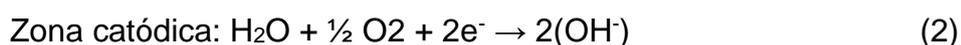
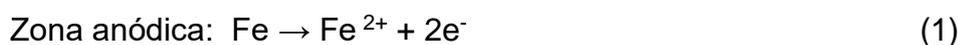
como armaduras protendidas ou de aço normal é atribuída ao efeito de mais de um fator, contudo a corrosão do metal inserido no concreto é o principal, visto que a conseqüente expansão do aço é que afeta o concreto em torno da armadura, sendo uma das principais causas de deterioração de estruturas.

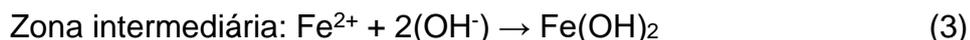
Atualmente, devido à ocupação do solo, observa-se uma quantidade imensa de estruturas de concreto que estão inseridas em meios altamente agressivos. Autores como Gjrv (2015), citam a alta concentração de cloretos como fator principal para a deterioração precoce das estruturas na costa da Noruega.

Diversos autores dissertaram sobre os conceitos da corrosão da armadura do concreto, como Cánovas (1988), Cabral (2000), Neville (1997), Cascudo (1997) e Helene (1993), sendo o ataque por cloretos como principal causa da corrosão. Segundo esses autores, ao ingressar no interior do concreto, o cloreto rompe uma película de passivação, uma fina camada de óxido que adere ao aço e fornece boa proteção contra água e oxigênio, após a destruição dessa camada, a alcalinidade do concreto é reduzida e é formada uma diferença de potencial elétrica entre dois pontos no aço e no concreto, formando uma célula eletroquímica.

Helene (1993) em seus estudos sobre o tema comenta que para a ocorrência da corrosão devem existir três condições básicas: a primeira, deve existir um eletrólito, a segunda, deve ser formada uma diferença de potencial de eletrodo e a terceira, deve existir oxigênio.

Segundo Cascudo (1997), com esses elementos básicos, a corrosão da armadura na zona anódica ocorre devido as reações de dissolução do ferro, nas zonas catódicas, não corroídas, ocorrem as reações de redução do oxigênio. Os íons Fe^{2+} se deslocam em direção ao cátodo e os íons hidroxila, OH^- , se deslocam em direção ao ânodo, se encontrando em uma região intermediária, produzindo hidróxido ferroso ($Fe(OH)_2$). Cada reação, nas zonas anódicas, catódicas e a intermediária, é apresentada nas equações de 1 à 3. Já a equação 4 apresenta a formação do hidróxido férrico.

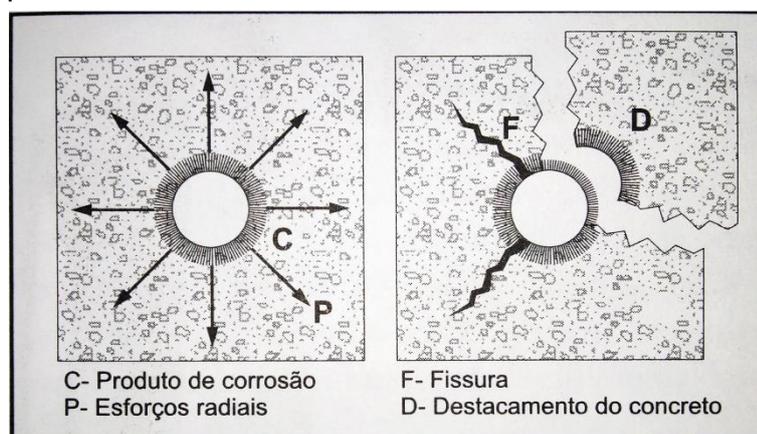




(4)

A partir do hidróxido ferroso, podem ser formados outros produtos, como o óxido férrico hidratado, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, sendo esses dois compostos muito expansivos. A Figura 5 representa os esforços adicionais inerentes ao processo corrosivo.

Figura 5– Esforços produzidos pela expansão do aço que levam à fissuração e destacamento do concreto, pela corrosão das armaduras



Fonte: Cascudo (1997)

Neville (1997) trata sobre a consequência da corrosão do aço. Os produtos da corrosão, expansivos, ocupam um volume muito maior que o do aço, de onde a reação partiu. Desse modo, ocorre fissuração e lascamento do concreto, deixando a área ainda mais suscetível a corrosão. A evolução da corrosão também diminui a área da seção transversal da zona anódica, reduzindo a capacidade resistente da peça.

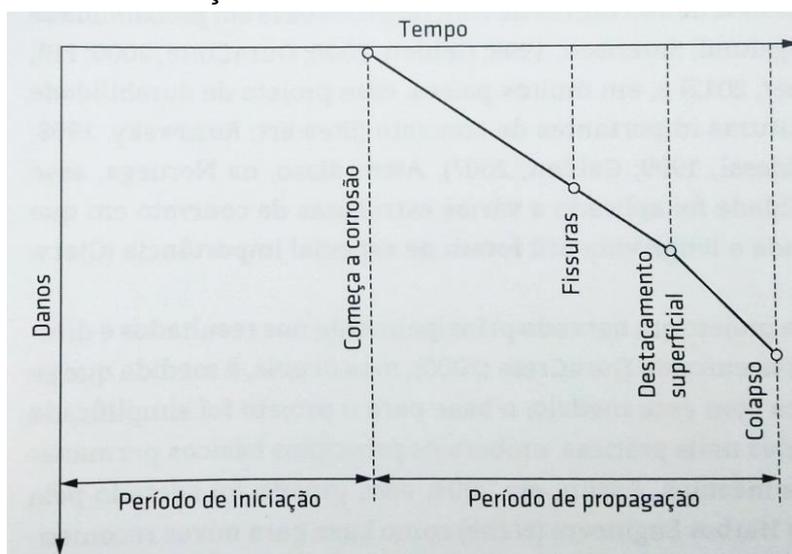
2.1.2 Avaliação do grau de deterioração.

Segundo Cabral (2000) a umidade relativa do meio ambiente é um fator importante no comportamento da armadura no concreto armado, principalmente durante a cura do concreto, pois influencia no grau de hidratação e conseqüentemente na porosidade do concreto. O concreto possui uma rede de poros, com diâmetros muito variáveis, que se conectados, podem chegar até

alguns milímetros. Na própria execução do concreto podem existir cloretos presente na massa, seja por aditivos ou do próprio ambiente, desse modo o concreto tende a conservar mais umidade, que também eleva o risco de corrosão do aço, pela redução da resistividade elétrica do concreto.

O modelo que é mais empregado atualmente divide o processo de degradação em duas partes, a primeira é o estágio de iniciação, em que ocorre a penetração do cloreto no concreto, porém sem causar dano a armadura, a segunda é o estágio de propagação efetiva, no qual as primeiras manifestações expostas na estrutura de concreto. A Figura 10 mostra as fases de degradação relativa ao grau de deterioração do aço.

Figura 6 - Degradação de estrutura de concreto pela a corrosão do aço



Fonte: adaptado de Tuutti (1982).

Após o cloreto chegar às armaduras, podem passar alguns meses ou anos para aparecerem sinais de danos, pode levar mais tempo ainda para que a capacidade de carga da estrutura seja reduzida de forma grave. Dessa forma, aparenta ser difícil desenvolver um modelo matemático generalizado para antecipar o tempo necessário para reduzir a capacidade portante da estrutura, visto que esse padrão de deterioração é influenciado pela forma do elemento estrutural, continuidade elétrica e exposição. GjØrv (2015) explana alguns métodos que dão uma estimativa do tempo necessário para os cloretos atingirem

as armaduras, pela espessura do concreto, dependendo da sua qualidade e de acordo com o ambiente o qual a estrutura está inserida, contudo isso não fornece nenhum suporte para a previsão ou estimativa da vida útil da estrutura.

Um modelo determinístico que pode ser usado na etapa de iniciação é a 2ª Lei de Fick, que é usada para a determinação da taxa de penetração de cloreto a certa profundidade no elemento estrutural, em um determinado tempo t . A Equação, segundo Dal Molin e Silvestro (2018) está representada a seguir.

$$C(x, t) = C_s \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4tD}} \right) \right] \quad (5)$$

$C(x,t)$ = concentração de cloretos na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t (%);

C_s = concentração superficial de cloretos (sendo admitida como constante) (%);

x = profundidade (cm);

D = coeficiente de difusão de cloretos(cm^2/ano);

t = tempo (anos);

erfc = função complementar de erro de Gauss.

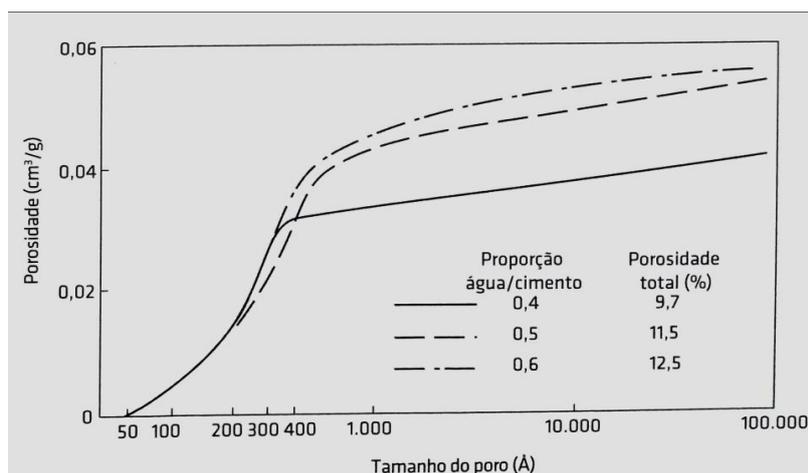
2.1.3 Requisitos de projeto para durabilidade.

Existem uma quantidade considerável de ambientes em que a deterioração das estruturas ocorre mais rapidamente. Andrade (1997) descreve que a redução da vida útil das estruturas alocadas nesses ambientes é geralmente atribuída a certos fatores, como avaliação inadequada do ambiente, que normalmente apresenta grandes concentrações de cloretos e sulfatos, acompanhada de alta umidade e com a presença de fortes ventos, situação que se encaixa perfeitamente no ambiente de Fortaleza.

Muitos pesquisadores como Andrade (1997), Neville (1997), Metha e Monteiro (2013) Gjrv (2015) e Vilasboas (2011) apontam que a relação

água/cimento e um bom grau de hidratação são fatores primordiais na durabilidade do concreto. Helene (2004) deixa claro que esses são os dois principais parâmetros que governam as propriedades como a absorção capilar, permeabilidade, difusividade e propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência. A seguir serão mostrados experimentos com diferentes tipos de cimentos e seus correspondentes no Brasil. Serão comparados cimentos com alto teor de escória, cimentos com adição de cinzas volantes e cimentos Portland puros. O gráfico da Figura 6 representa a variação do tamanho do poro e a porosidade em cimentos com diferentes relações a/c.

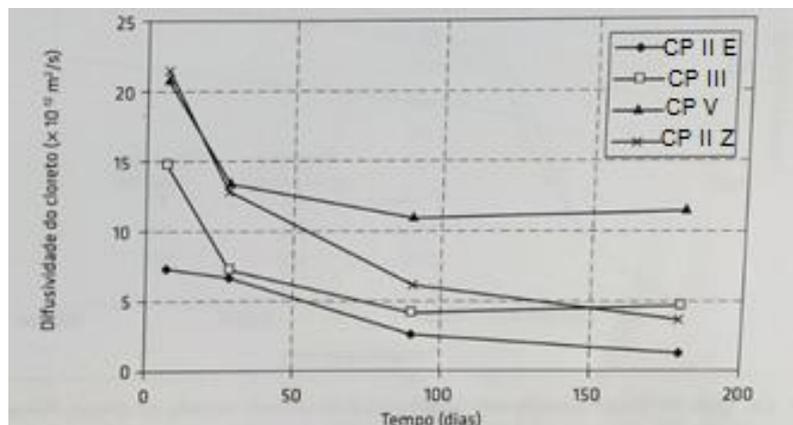
Figura 7 - Efeito da relação água cimento na dimensão dos poros no concreto com cimento Portland puro



Fonte: Gjrv e Vennesland (1979, com adaptações)

Metha e Monteiro (1994) afirmam que a permeabilidade do concreto é maior que a permeabilidade da pasta de cimento, devido às microfissuras na região da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, nos intervalos de tempo iniciais de hidratação a região de transição é fraca e vulnerável à fissuração, normalmente causados por esforços diferenciais entre a pasta de cimento e o agregado, retração pela secagem, contração térmica e aplicação de cargas externas. O gráfico da Figura 7 mostra a variação da difusividade do cloreto a depender do cimento utilizado na relação água/cimento de 0,45.

Figura 8 - Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com a relação água/aglomerante de 0,45



Fonte: Arskog (2007, com adaptações)

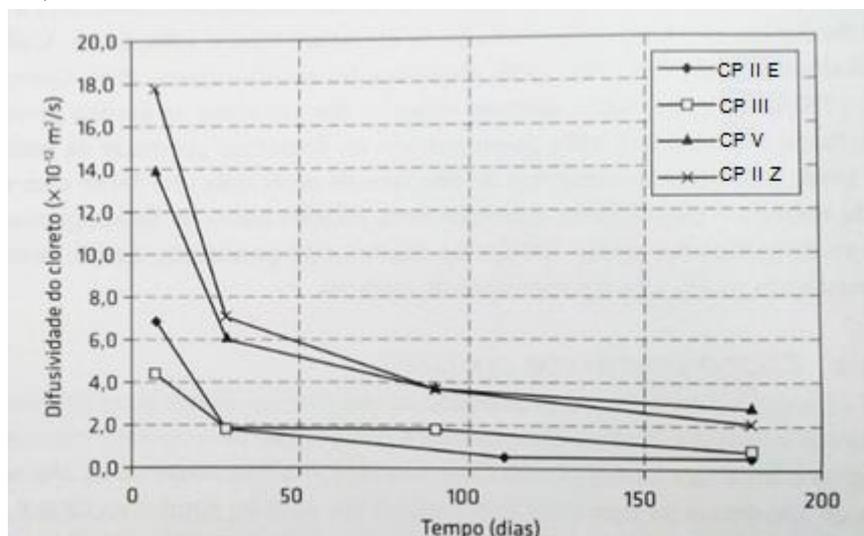
Cimentos com alto teor de escória CEM II/B-S 42,5 R NA (GGBS1, similar ao CP II E 40 no Brasil) e o CEM III/B 42,5 LH HS (GGBS2, similar ao CP III 40 no Brasil), com 34% e 70% de escória respectivamente.

Cimento Portland puro de alto desempenho do tipo CEM I 52,5 LA (HPC, similar ao CP V no Brasil)

Cimento de cinzas volantes CEM II/A V 42,5 R, com 18% de cinzas volantes (PFA, similar ao cimento composto CP II Z 40 no Brasil).

O gráfico da Figura 8 mostra a variação da difusividade do cloreto a depender do cimento utilizado na relação água/cimento de 0,38.

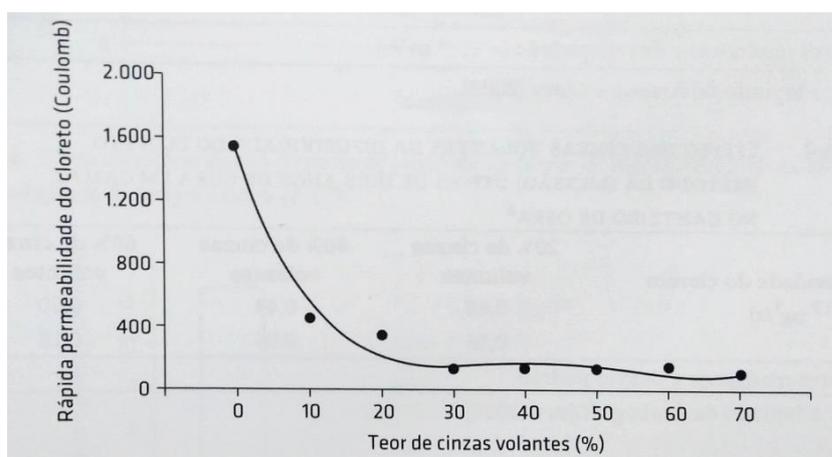
Figura 9- Efeito do tipo de cimento na resistência do concreto à penetração do cloreto, com a relação água/aglomerante de 0,38



Fonte: Arskog *et al.* (2007, com adaptações)

Percebe-se que os dois cimentos de escória são bem mais resistentes à penetração do cloreto do que os cimentos de cinzas volantes e consideravelmente mais resistente que o cimento Portland puro. O gráfico da Figura 9 mostra o efeito da permeabilidade do cloreto com a variação do teor de cinzas volantes.

Figura 10 - Efeito da escória de alto-forno na difusividade do cloreto no concreto pelo método RCM



Fonte: Sengul e Gjörv (2007, com adaptações)

A importância da barreira física de um revestimento bem especificado já é vastamente debatida na literatura, e normas como a brasileira, a ABNT NBR

6118:2014, e a americana, ACI Building Code 318 (ACI, 2014), especificam cobrimentos mínimos para concretos expostos em ambientes agressivos.

Em regiões equatoriais, a temperatura ambiente mais elevada atua aumentando a energia cinética da maioria dos processos envolvidos na corrosão, elevando a concentração de cloro livre na água e o coeficiente de difusão dos cloretos.

Na norma ABNT NBR 6118:2014, no quesito referente à classe de agressividade ambiental não são citados valores específicos para a classificação da agressividade ambiental, a escolha das condições do meio onde a obra está situada dependerá da competência do projetista em relação a norma, da sua experiência e do bom senso. Para Fortaleza uma cartilha de agressividade ambiental pode ser usada para o entendimento real das classes de agressividade.

2.1.4 Método de recuperação.

Canóvas (1988) comenta que os passos para a reparação de elementos danificados pela corrosão podem ser resumidos em eliminação do concreto deteriorado, vedação de fissuras por injeção de resina epóxi, restauração da capacidade resistente das armaduras, aplicação de novo concreto e, caso necessário, aplicação de um tratamento superficial, tanto para pequenas quanto para grandes áreas.

Souza e Rippier (2009) ressaltam a importância da remoção completa do concreto deteriorado e o preparo do substrato para o processo de recuperação, o qual se não estiver adequado para receber o reparo, não importa a técnica, terá sido apenas gasto de material, majoritariamente. Além de um substrato aderente, para as intervenções em estruturas atacadas por cloreto é necessária toda a remoção desse ator, qualquer resquício de cloreto na estrutura, possibilitará a continuação da corrosão.

Segundo Helene (1992) e Canóvas (1989), as técnicas que auxiliam na remoção de cloretos estão descritas abaixo.

Para o concreto, é necessária uma escarificação, em pequenas áreas afetadas poderá ser executada manualmente com talhadeira e martelo. Para

grandes áreas atingidas a escarificação será mais eficiente com equipamentos mecânicos, como discos de desbaste e lixamento elétrico ou equipamentos pneumáticos que proporcionam jatos de areia úmida.

Com a remoção do concreto defeituoso, é importante observar a possível existência de fissuras no núcleo. Se estas existirem, será necessária uma injeção de resina epóxi de baixa viscosidade.

Para armaduras, é necessária a remoção de todo cloreto contaminante da armadura. A eliminação do cloreto pode ser dada com um jato de areia úmido, o qual é utilizado em grandes áreas e locais angulosos. O equipamento é constituído de um compressor de ar, equipamento de jato de areia, mangueira de alta pressão, bico direcional e água. A areia deve ter fina granulometria, isenta de matéria orgânica e não é reaproveitável. O procedimento consiste em manter o bico de jato numa posição ortogonal à superfície de aplicação, com movimentos circulares constantes, distribuídos uniformemente o jato para melhor remoção de todos os resíduos.

Com a diminuição da capacidade resistente das armaduras pela corrosão e a conseqüente diminuição da carga portante, a restauração das armaduras será feita cortando-se os pedaços existentes de barras danificados e substituindo por novas barras, que podem ser soldadas as já existentes ou ancoradas diretamente ao concreto por meio de ganchos chumbados por meio de resinas epóxi.

Para reforço de pilares, segundo Piancastelli (1997) o ideal seria aliviá-lo de sua carga. No entanto, normalmente o alívio só é conseguido de forma parcial, ou seja, o pilar original ainda possui solicitações no instante do reforço, para vigas o reforço é executado para conter o mau desempenho as solicitações de flexão e cisalhamento, flechas excessivas podem não apresentar uma ameaça à segurança, mas causam desconforto aos usuários e prejudicam o funcionamento de outros elementos estruturais. Em lajes, comumente se reforça à flexão e à punção, reforço ao cisalhamento são incomuns e ocorrem com baixa frequência em obras industriais.

CAPÍTULO 3

Agressividade por cloreto na cidade de Fortaleza

3.1 Aspectos gerais

O conhecimento de que o ambiente marinho é agressivo ao ambiente construído já é bem consolidado. A influência desse ambiente na longevidade das construções está sujeita ao microclima no qual a edificação está inserida, de forma que o ambiente marinho pode atuar de maneira específica, com reações de deterioração amplamente estudadas.

Segundo Gjrv (2015), a Noruega tem grande tradição no uso de concreto em estruturas implantadas em ambiente marinho, por consequência de possuir litoral longo e irregular. Aos poucos a diversidade de aplicações do concreto aumentou, passou a ser aplicado em túneis submersos, pontes flutuantes e na superação de estreitos.

Apesar desses benefícios e diversidade de aplicações, as superfícies expostas do concreto estão passíveis de agressões do meio onde estão inseridas, em certos casos até no momento da construção da estrutura, sendo a degradação ainda mais significativa em grandes centros urbanos, regiões industriais e edificações localizadas em ambientes marinhos.

Para Cánovas (1988), é fundamental o conhecimento das particularidades da região onde será constrda uma estrutura, com o objetivo de adotar medidas profiláticas na etapa de projeto com a finalidade de mitigar as ações agressivas do meio ambiente.

Andrade (1997) aponta que a análise da agressividade ambiental, baseada em dados e registros meteorológicos, é fundamental para prever a durabilidade das estruturas de concreto, sendo um compromisso que dever ser firmado como parte do planejamento da edificação. Mircea *et al.* (1994) afirma que a análise do desempenho dos elementos estruturais nas diversas classes de agressividade ambiental é de extremo interesse dos especialistas atualmente, sendo exemplo os estudos recentes da agressividade do ar atmosférico em Fortaleza, desenvolvido por Campos (2016), Albuquerque e Otoch (2005) e Portella (2013).

Pontes (2006) salienta que as pesquisas sobre durabilidade já eram realizadas desde meados do século XX. As primeiras análises foram em obras que estavam situadas em ambiente marítimo, já que essas estruturas revelaram problemas, devido ao meio altamente agressivo.

Pontes (2006) ainda declara que, em pesquisas de estruturas marítimas nos Estados Unidos Hadley (1948), Noruega Metha e Monteiro (1994), Suécia Chandra, Cederwall e Nilsson (1994), estruturas com 20 anos de idade já apresentavam problemas significativos de deterioração, construções de concreto em Hong Kong na década de 50, conforme Liauw (1974), utilizaram água do mar no amassamento, além de ter gerado elevados custos de manutenção, foram demolidas com uma vida útil de 15 anos.

O Brasil ostenta ampla costa marítima banhada pelo Oceano Atlântico, segundo o IBGE (2014), a extensão era de 7367 km, tendo o Nordeste como destaque no quesito agressividade, em especial, a cidade de Fortaleza como cidade portuária.

A cidade de Fortaleza está situada no nordeste brasileiro, sendo a capital do estado do Ceará. O clima é tropical com temperatura anual média de 26.5°C. A cidade possui um total de 15 praias, com 34 Km de extensão no total, todas contribuindo para a disseminação de íons cloro na atmosfera.

3.2 Temperatura

Cabral (2000) cita que além das grandes cidades brasileiras estarem sobre influência da névoa salina e sujeitas à contaminação dos materiais de construção pelos sais, as altas temperaturas surgem como fator agravante, de modo que trabalham como catalisador do processo corrosivo.

Sabe-se que a velocidade de degradação é acelerada em temperaturas mais elevadas. Geho-CEB (1993) *apud* Vilasboas (2013) verifica que um aumento de 10°C na temperatura dobra a velocidade das reações vinculadas à degradação do concreto armado. Segundo Vilasboas (2013) esse motivo faz com que os ambientes tropicais sejam bem mais agressivos que os climas temperados do norte da Europa.

3.3 Umidade

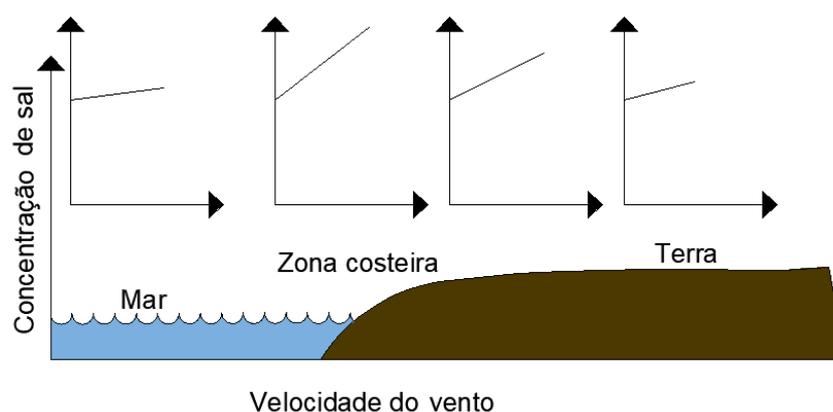
López, González e Andrade (1993) afirmam que, em ambientes secos, geralmente a expectativa de vida das estruturas crescem com a elevação da temperatura pela perda do eletrólito, o que dificulta a corrosão, desse modo o efeito da temperatura não pode ser considerado de forma isolada, devendo ser relacionado com a umidade relativa do ambiente juntamente com o grau de saturação dos poros do concreto. Segundo a Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME) a umidade média de Fortaleza é superior a 70%, chegando até 80% em algumas épocas do ano.

Segundo Albuquerque e Otoch (2005), na década de 80 já existiam artigos que alertavam para a agressividade ambiental da cidade de Fortaleza devido à salinidade do mar do Ceará.

3.4 Velocidade dos ventos

A formação do aerossol marinho está diretamente ligada à velocidade dos ventos e à concentração de sais no aerossol. Estudos indicados por Pontes (2006) demonstram que esta relação segue uma função do tipo exponencial. Lovett (1978) apontou ainda que este comportamento é devido ao fato de que o incremento da velocidade do vento provoca um aumento na quantidade de partículas no aerossol e facilita a produção de elementos de maior massa. A Figura 11 mostra uma representação da concentração de sal com a velocidade dos ventos, no mar, na zona costeira e na zona terrestre.

Figura 11 – Esquema da concentração com a velocidade do vento



Fonte: Gustafson e Franzen (1996, com adaptações)

Gustafsson e Franzén (1996) *apud* Borba Júnior (2011) descrevem que o vento tem uma significativa relação quando o aerossol é transportado na direção do continente. Devido a amplitude, partículas maiores podem alcançar grandes distâncias antes de se depositarem. Morcillo *et al.* (2000) ainda reforça que os ventos com origem do mar são os que atuam no incremento da solução salina, enquanto que os ventos provenientes do continente são desconsiderados.

De acordo com Borba Júnior (2011), quanto maior a velocidade dos ventos maior a concentração de cloretos na atmosfera.

No quesito velocidade dos ventos, vários autores dissertam sobre o valor de uma velocidade crítica, a partir da qual a formação e o transporte de partículas maiores sucederiam, ocasionando maior concentração de cloretos na atmosfera. Pelo quadro, admite-se o valor de 3 m/s como o mais aceito pelos autores. O Quadro 1 faz um resumo de algumas velocidades críticas adotadas por diferentes autores.

Quadro 1 - Velocidade crítica adotada pelos autores consultados.

Autor(es)	Velocidade crítica
Piazzola e Despiau (1997)	> 5m/s
Fitzgerald (1991)	>3m/s
O' Dowd <i>et al.</i> (1996)	
Meira (2007)	

Fonte: Borba Júnior (2011, com adaptações)

3.5 Distância do mar

Gustafsson e Franzén (1996) *apud* Pontes (2006) relatam que a influência do vento na concentração de sal na atmosfera diminui à medida que se afasta do mar, tanto devido aos obstáculos na costa como o efeito gravimétrico que se sobressai ao efeito do vento. No mar as partículas são formadas continuamente, de modo que não permite a redução de concentração de cloretos na atmosfera.

3.6 Considerações das normas ABNT 6118:2014 e ABNT NBR 15575:2013

Nas diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto segundo a NBR 6118 (2014), no item 6.1 estabelece que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de forma que sob as condições ambientais na época de projeto e utilização, conforme o projeto, mantenham-se seguras, estáveis e garantam o estado de serviço durante o prazo da vida útil de projeto.

Por vida útil de projeto, o item 6.2.1 define como o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, assim como sejam executados serviços de reparo provenientes de danos acidentais.

Nota-se que a durabilidade das estruturas demanda participação e atitudes combinadas de todos os envolvidos nas fases de projeto, construção e utilização. Albuquerque e Otoch (2005) destacam que uma mudança cultural deve ser provocada para que o setor da construção civil se aproxime do setor automobilístico, para que as edificações passem por manutenções preventivas regularmente.

O item que trata da agressividade ambiental, item 6.4, aborda as ações químicas e físicas que agem sobre as estruturas de concreto. Sendo elas as principais responsáveis pela rapidez e intensidade da degradação do concreto e corrosão da armadura.

A NBR 6118:2014 classifica o grau de agressividade ambiental em 4 classes, dependendo das condições de exposição da estrutura, fazendo uma relação entre o tipo de ambiente e o risco de deterioração da estrutura.

Conforme Portella (2013), apesar da norma NBR 6118:2014, embora o trabalho de Portella (2013) seja anterior à publicação da NBR 6118:2014 o item comentado não sofreu alterações, exigir do projetista cuidados na elaboração dos projetos e ter conhecimento prévio da agressividade do meio ambiente, ela fica devendo quanto a mensuração da durabilidade da estrutura, de acordo com o tipo de obra, situação de exposição e a finalidade, sendo esses parâmetros já

abordados por algumas normas internacionais, como a ACI Building Code 318 (ACI, 1995).

A norma NBR 15575 especifica para as estruturas das edificações uma vida útil mínima de 50 anos, intermediária, igual ou acima de 63 anos e superior acima de 75 anos. A vida útil mínima de 50 anos foi adotada para compatibilizar a construção de moradias de interesse social, as limitações referentes aos custos iniciais com os requisitos do usuário relacionados à durabilidade e aos custos de manutenção, de forma a certificar, por um certo prazo a utilização no estado limite de serviço da edificação. Para a vida útil de projeto superior, recomenda-se o prazo de 75 anos de forma a direcionar o setor da construção de edificações para o que é tecnicamente possível e viável de ser obtido, empregando os materiais, técnicas e processos construtivos mais modernos.

3.7 Climatologia de Fortaleza

Em estudos recentes sobre a agressividade do ar de Fortaleza, foi apresentada a caracterização climatológica da cidade mais atual.

A direção predominante dos ventos é de leste e sudeste, ou seja, adentrando a cidade pela praia do futuro, com velocidade anual média de 3,63 m/s, ou seja, valor superior ao crítico de 3 m/s segundo a literatura.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o mesmo período dos estudos verificou que a variação de umidade variou entre 69% e 80%.

Segundo Portella (2013) a temperatura média da cidade de fortaleza situa-se na faixa de 23° a 32°, a média em torno de 26° a 28°.

Estudos mais recentes como Albuquerque e Otoch (2005), Portella (2013) e Campos (2016) atestaram a cidade de Fortaleza com grande destaque no quesito agressividade do ar. Campos (2016) mapeou a cidade em regiões com diferentes níveis de agressividade, de acordo com a concentração do teor de cloretos, dessa forma a classificação tornou-se objetiva.

Portella (2013) conclui que a combinação das altas temperaturas, com os grandes períodos de insolação, com as correntes de ventos e da alta umidade

relativa do ar, se constitui em fatores climatológicos de importante influência na formação de névoa salina. Os períodos de umedecimento e secagem ainda proporcionam condições climáticas ideais para o processo de corrosão das armaduras.

Em Campos (2016) foram apresentadas duas propostas para a classificação de agressividade ambiental de Fortaleza, uma de acordo com trabalho de Vilasboas (2013) e outra fundamentada no estudo de Meira et al (2010) e na segunda lei de Fick. A Figura 12 e 13 mostram o mapa de fortaleza dividido em zonas de agressividade, de acordo com o estudo de Campos (2016).

Figura 12 – Proposta de classificação de classe de agressividade ambiental de acordo com Vilasboas (2013)



Fonte: Campos (2016)

Figura 13 – Proposta de classificação de classe de agressividade ambiental de acordo com Meira *et al.* (2010)



Fonte: Campos (2016)

Para este estudo, a proposta recomendada é a referente aos estudos de Vilasboas (2013), que é a classificação mais conservadora, já que a classe IV (muito forte) cobre uma maior região da Praia do Futuro e a classe III (Forte) cobre grande área da Praia de Iracema. Já na segunda proposta, a classe predominante é a II (Moderada).

CAPÍTULO 4

Recomendações para o projeto e recuperação de estruturas

4.1 Aspectos gerais

Neste capítulo, serão abordados, de forma breve, alguns dos materiais e os procedimentos apresentados na literatura consultada para o projeto e recuperação de estruturas de concreto em ambientes com alta concentração de cloretos, com o objetivo de possibilitar uma utilização precisa, com base em um diagnóstico previamente executado.

Os ataques por íons cloreto no concreto podem ter início no momento em que o concreto é produzido ou através do meio ambiente. Cabral (2000) e Babosa *et al.* (2004) citam o uso de agregados infectados, aditivos aceleradores de pega contendo cloretos e água contaminada como exemplos de contaminação no momento do amassamento, mas que esse último por conta dos avanços científicos sobre os males provocados por essas ações, atualmente é improvável que aconteça. A maior parte dos problemas são devidos ao ingresso do cloreto através do meio ambiente.

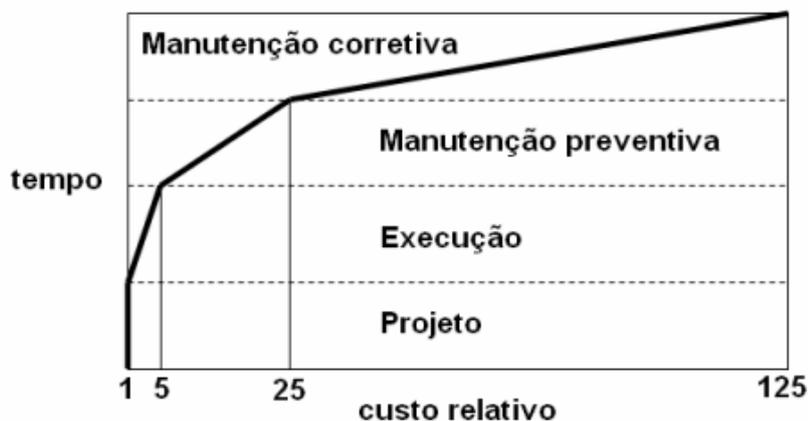
As recomendações pretendendo a durabilidade das estruturas devem ser determinadas em nível de projeto, do ponto de vista econômico, principalmente. Andrade (1997) elucida a importância da definição das condições da durabilidade que a estrutura apresentará durante a vida útil. Escolhas adotadas a nível de projeto e na etapa de dosagem do concreto são sempre mais apropriadas, pois influenciam positivamente na segurança e na economia, segundo estudos de Andrade (1997), Helene e Medeiros (2011). Essas medidas podem refletir em custos adicionais, desse modo as soluções sempre deverão ser discutidas com o proprietário da estrutura antes da aplicação, mas vale lembrar que o custo adicional direto será compensado nos custos indiretos durante o uso da edificação.

Ainda se observa a inexistência de uma visão global do processo construtivo, como o fator desempenho da estrutura. Idorn *et al.* (1992) *apud* Andrade (1997) afirmam que deve haver um rígido controle das etapas de construção da estrutura, já que nenhuma decisão tomada na etapa de projeto será suficiente se na etapa de execução não existir um bom controle. Canóvas

(1988) cita que os procedimentos de mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura, são os que mais influenciam na durabilidade do concreto. Já Brandão (1998), foca nos procedimentos de lançamento, adensamento e cura, elucida que todo processo deve ser documentado, já que durante a fase construtiva é percebida uma influência significativa nas dimensões da estrutura, especialmente o cobrimento.

Se a solução não for tratada na etapa de projeto, o custo de adiar o tratamento das patologias aumentará cada vez mais ao longo do tempo. O crescimento do custo de intervenção pode ser representado pela Lei de Sitter, conhecida por lei dos 5, é representada por uma progressão geométrica de razão 5. Rostam (1991) *apud* Castro (1994) cita que apesar de tais custos possuírem caráter genérico e aproximados, a lei é aceita como representação do potencial de gastos que podem ser poupados quando são tomadas atitudes preventivas desde as primeiras fases do processo de construção da estrutura. A Figura 14 mostra a representação da Lei de Sitter.

Figura 14- Evolução dos custos de intervenção nas fases da vida da estrutura



Fonte: Sitter (1984) *apud* Helene (1997).

Andrade, Helene e Medeiros (2011) explicam sobre a possibilidade de usar um concreto não recomendável mantendo a segurança e durabilidade para a agressividade do ambiente no qual se localiza a estrutura, desde que sejam tomadas medidas preventivas e corretivas em outras esferas do projeto e utilização, respectivamente. Tal fato é característica da maioria das construções

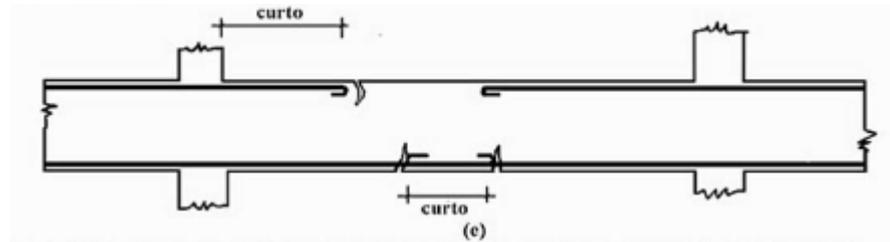
brasileiras em operação, sendo necessárias medidas posteriores de reparo e recuperação para garantir a conservação da segurança e manutenção da vida útil da estrutura.

Para o processo de reparo da estrutura, todo o íon cloreto deve ser eliminado, Reis (2001) aborda o fato de que um dos maiores problemas dos sistemas de proteção em reparos, é que somente parte da armadura é protegida, cria-se uma não uniformidade no sistema, que pode potencializar as reações de corrosão. Ou seja, uma região previamente catódica poderá se tornar anódica ou uma região catódica se tornar mais catódica, acelerando o processo corrosivo.

4.2 Recomendações para o projeto

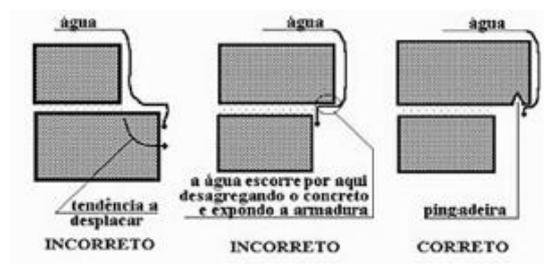
Quando é comentado sobre falhas que acontecem na etapa de projeto, logo é associado ao fato de erros de cálculo terem sido cometidos, mas segundo Somerville (1985) *apud* Andrade (1997), problemas de cálculo raramente são a fonte do problema nessa etapa, o que normalmente ocorre é um detalhamento deficiente, falta de atenção ou negligência ao meio ambiente em que a estrutura se localizará, como também a interação entre os tipos de elementos que fazem parte da estrutura, podendo ter função estrutural ou não. A Figura 15 e 16 mostram erros de detalhamento comuns, segundo a literatura consultada.

Figura 15 – Erro de detalhamento que favorece o aparecimento de fissuras



Fonte: Souza & Rippier (2009)

Figura 16– Inadequação ao ambiente que possibilita a desagregação do concreto



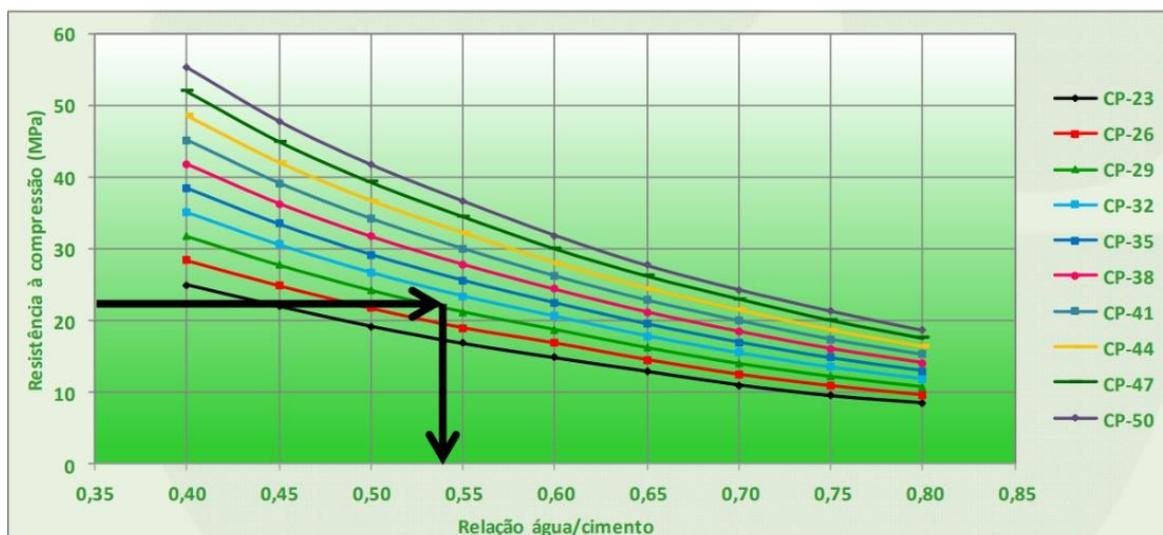
Fonte: Souza & Rippier (2009)

4.2.1 Relação água/cimento e grau de hidratação

A dosagem da relação a/c para determinadas condições de agressividade é importante tanto para a durabilidade quanto para a resistência de uma estrutura, permitindo o ganho de resistência e redução da permeabilidade, já que essas duas propriedades guardam uma estreita relação.

Segundo GjØrv (2015) e Mehta e Monteiro (2013), a permeabilidade do concreto é a chave para controlar os processos envolvidos na corrosão, portanto para uma boa análise da resistência do concreto ao ataque de cloretos, vários elementos devem ser observados, um dos mais importantes é a relação água/cimento, não recomendando ser maior que 0,40 em cimentos Portland puros, devido ao aumento de porosidade. O gráfico da Figura 17 mostra a variação da resistência com a alteração da relação água/cimento para diferentes tipos de cimento.

Figura 17 – Gráfico resistência à compressão x relação a/c



Fonte: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2014/05/Palestra_Itambe_Cimento.pdf

4.2.2 Tipos de cimento

Além disso, a escolha do tipo de cimento é de vital importância. Combinando cimentos de alto teor de escória com uma variedade de materiais pozolânicos, sempre mantendo a relação água/aglomerante baixa, são alcançadas baixas difusividades, produzindo assim, concretos com grande resistência à penetração de cloretos.

Cimentos com adição de escória de aciaria são os mais indicados, CP II E 40, com adição de escória (34%), CP III 40 com adição de escória (70%), seguidos por cimentos com adição de cinzas volantes, CP II Z 40, com adição de 18% de cinzas. Quando comparados a cimentos Portland puros (CP V) apresentam difusividade muito menor.

4.2.3 Processos construtivos

No projeto também devem ser passadas as informações sobre os processos construtivos, de forma a viabilizar e otimizar a execução dos procedimentos visando a durabilidade, como cobrimento, adensamento e cura. Brandão (1998) ressalta que um adensamento mal executado pode refletir em um concreto mais poroso, enquanto a cura insuficiente produz baixo grau de hidratação do concreto, principalmente na superfície do material, resultando em

um concreto com alta permeabilidade, diminuindo a durabilidade por consequência.

O cobrimento é fundamental para a proteção das armaduras em ambientes agressivos. Ele, em muitos casos, apresenta uma alta variabilidade da qualidade especificada e da execução, muitas vezes devido à baixa qualidade de mão de obra e fiscalização deficiente. Existem sistemas de indução e sistema de varredura sofisticados para o controle do cobrimento executado, auxiliando no controle de qualidade. A Figura 18 mostra vazios de concretagem em laje, facilitando, e muito, o início do ataque por cloretos.

Figura 18 – Vazios de concretagem em uma laje causada por problemas no adensamento e traço do cimento



Fonte: Votorantim cimentos

Para Neville (1997) e Gjrv (2015) existe uma limitação para esse tipo de abordagem, grandes espessuras de cobrimento resultariam em notáveis volumes de concreto sem armadura, aumento da carga permanente e de fissuras inaceitáveis, apesar de poder mitiga-las com fibras sintticas, não é uma medida razoável pelo custo. Finalmente em termos práticos recomenda que a espessura do cobrimento não deve ser maior que 100mm.

4.2.4 Elaboração de manual

Andrade (1997) explana a importância da elaboração de um plano de manutenção completo da estrutura, manual que tem íntima ligação com a agressividade do meio e nível de sensibilidade da estrutura, como também deve-

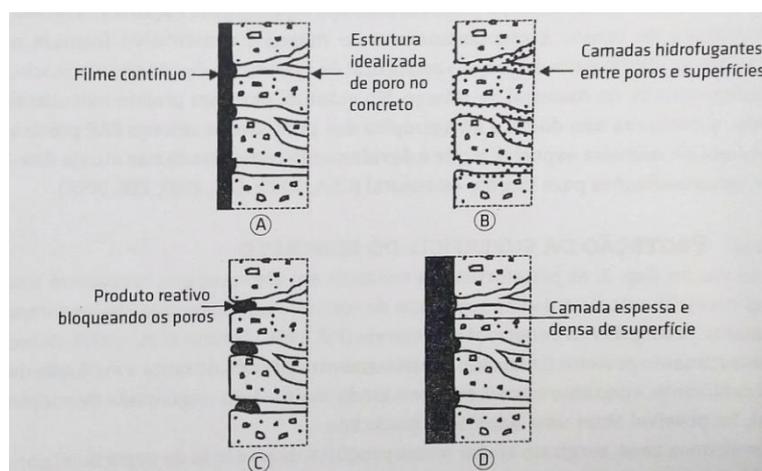
se registrar o comportamento da estrutura durante o período de utilização, através de inspeções de rotina

O risco de exposição precoce aos íons cloro antes que o concreto atinja maturidade e densidade suficiente também é um problema citado na literatura, sendo necessária medidas de proteção e precaução no uso e fabricação do concreto.

4.2.5 Proteção do concreto

Nos últimos anos tem surgido produtos para a proteção da superfície do concreto, tanto para retardar como para prevenir a penetração dos cloretos. Os efeitos dos produtos podem ser tanto a redução da penetração como a redução do teor de umidade do concreto. Medeiros *et al.* (2015) agrupa os materiais de proteção em 3 categorias, já Gjrv (2015), adiciona mais uma classe e agrupa os produtos de proteção em 4 categorias, revestimentos orgânicos que formam uma película contínua sobre a superfície do concreto, tratamentos hidrofugantes focados no revestimento da superfície interna dos poros do concreto, terapias que preenchem os poros do concreto e tratamentos com uma camada cimentícia espessa e densa. A Figura 19 ilustra o funcionamento de diferentes tipos de proteção superficial do concreto.

Figura 19 – Representação dos diferentes tipos de proteção superficial do concreto



Fonte: Gjrv (2015, p.134).

Tratamentos hidrofugantes baseados em polímeros precisam ser reaplicados rotineiramente para garantir proteção a longo prazo, estudos de

Arntsen (2001) e Arskog *et al.* (2004) alertam para a aplicação desse tratamento de forma tardia. Quando os cloretos já penetraram uma certa profundidade ocorre uma penetração adicional desses íons devido à redistribuição do teor de cloretos na estrutura.

Existe também a possibilidade dessa solução para a etapa de projeto, alterando o traço do cimento de modo a tornar a massa do concreto hidrofugante acrescentando agentes como aditivos no concreto fresco, essa possibilidade é adequada tanto para as partes críticas da estrutura como para elementos pré-moldados de concreto.

Medeiros *et al.* (2014) elucida que produtos hidrofugantes à base de epóxi apresentam maior resistência ao ataque de cloretos, quando comparados com produtos à base de silicatos, silanos e cimentos quartzoso, comparando ângulo de contato, absorção capilar e carga passante. Neville (1997) comenta que características como absorção capilar não devem ser usada como uma medida de qualidade do concreto, e sim como um índice qualitativo, já que quase todos os concretos de boa qualidade apresentam baixos índices de absorção.

4.2.6 Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão podem ser especificados tanto na etapa de projeto quanto na etapa de recuperação da estrutura, na etapa de amassamento, Brett e Brett (1996) define os inibidores de corrosão como substâncias orgânicas ou inorgânicas que são acrescentadas à mistura em concentração reduzida, com a finalidade de diminuir a velocidade da corrosão. Para o concreto ainda deve ser considerada a influência desse tipo de substância nas suas características.

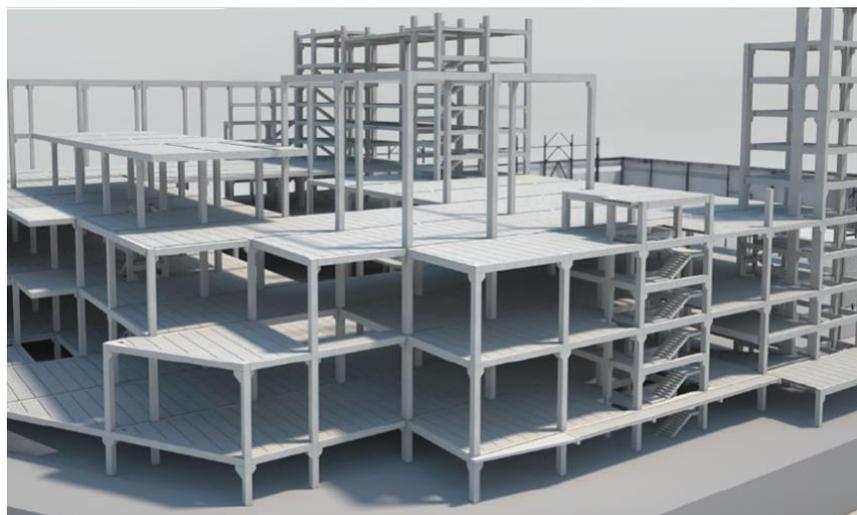
Existem uma vasta gama de inibidores de corrosão, Gjrv (2015) cita algumas pesquisas com o uso dessas substâncias, mostrando que apesar dos inibidores serem adicionados ao concreto fresco, os mecanismos de proteção podem variar bruscamente de um tipo de produto para outro. Nessas pesquisas o inibidor mais testado e mais aplicado foi o nitrato de cálcio, pois além de prevenir ele reduz a taxa de corrosão. Alguns autores fazem ressalvas para a aplicação dessa substância, afirmando que ao longo do tempo o nitrato de cálcio será consumido, enquanto a concentração do cloreto irá aumentar, devido à exposição contínua, dessa forma é complicado de garantir o efeito de longo

prazo dessa medida. Além do fato de que se a concentração de nitrato de cálcio for muito baixa, o inibidor pode induzir a aceleração da corrosão, como explica Page (2002).

4.2.7 Pré-fabricação

Construções com elementos estruturais pré-fabricados são uma boa solução para estruturas em ambientes agressivos, já que seu processo de fabricação é meticulosamente controlado, desse modo além de não haver possibilidade de exposição precoce ao cloreto, existe a facilidade do emprego de sistemas de proteção na superfície do concreto. Além disso, caso seja possível aguardar o processo de secagem antes da exposição da peça ao meio agressivo é mais um ponto positivo para a adoção dessa solução estrutural. A Figura 20 ilustra um projeto de estrutura pré-fabricada.

Figura 20 – Projeto de estrutura pré-fabricada



Fonte: Leonardi pré-fabricados

4.3 Recuperação de estruturas atacadas por cloretos

Para a recuperação de estruturas atacadas por cloretos é necessário remover todo o íon cloreto, já que eles não são consumidos nas reações e ficam livres para continuar a corrosão após o término do processo reativo.

O que confirma Helene (1993), em que recomenda a limpeza das cavidades devido à corrosão por pites, pois é nelas que os cloretos e os ácidos se concentram e caso não sejam removidos durante o processo de reparo, o

novo concreto envolvente, mesmo com elevado pH, não será capaz de repassivar a armadura, uma vez que o ambiente ácido remanescente propiciará continuidade da corrosão.

Lapa (2008) define pite como uma célula de corrosão que é distribuída em uma área passivada que atua de maneira catódica, enquanto existem áreas atuando como micro-ânodos, distribuídos em uma pequena região, formando pequenos furos nas armaduras.

4.3.1 Estratégias de intervenção

As estratégias de intervenção na estrutura segundo Rilem (1994) *apud* Cabral (2000) devem abranger avaliação da capacidade portante residual da estrutura, segurança estrutural, causa das anomalias, grau e quantidade dos danos, expectativa de progressão dos danos e os seus efeitos no desempenho e funcionalidade da estrutura. O objetivo básico do reparo será parar ou reduzir o processo corrosivo, intervindo no processo catódico ou anódico ou na condução eletrolítica, processos que são responsáveis pela formação da célula de corrosão.

Rilem (1994) *apud* Cabral (2000) ainda resume as estratégias de intervenção em 4 grupos, sendo destacados 3 deles: Substituição ou reconstrução parcial dos componentes danificados, usada quando o dano é limitado aos elementos mais expostos, podendo ser substituídos, intervenções que inibem o processo corrosivo, regenerando as zonas de armaduras atingidas e a substituição do concreto afetado e finalmente, não intervir no processo de corrosão, adotando apenas medidas paliativas, até que seu uso se torne insustentável.

Helene (1993) classifica os métodos de reparo de acordo com o mecanismo de proteção, divide-os em cinco categorias. Sistemas de reparo por passivação, materiais que recompõem a passivação oferecida pelo concreto, como argamassas, grautes e concretos de cimento Portland modificados com resinas. Sistemas de reparo por barreira sobre a armadura, abrangem materiais e sistemas que fornecem proteção por barreira diretamente as armaduras, como argamassas base epóxi, poliéster, primers e tintas de base epóxi. Sistemas de reparo por barreira sobre o concreto, englobam os materiais e sistemas que

forneem proteção diretamente à superfície do concreto como pinturas, concreto de boa qualidade e bom revestimento. Sistemas de reparo por inibição, abarcam os inibidores químicos e orgânicos à base de nitritos e benzoatos. Sistemas de reparo por proteção catódica, abrangem os materiais como primers a base de zinco, o próprio metal zinco e o alumínio, materiais que fornecem proteção catódica galvânica no geral.

Desse modo, para a proteção da armadura, por métodos aplicados no concreto tem-se, o sistema de reparo por passivação, sistema de reparo por inibição e sistema de reparo por barreira. Os métodos aplicados diretamente na armadura têm-se a proteção catódica e a proteção por barreira.

4.3.2 Sistemas de reparo atuantes sobre o concreto

4.3.2.1 Sistema de reparo por repassivação

Cabral (2000) orienta que sistemas de reparo por repassivação do concreto são mais utilizados quando o agente iniciante da corrosão é a carbonatação, já que o desempenho desse método é ruim quando a taxa de contaminação do concreto por cloretos é elevada, contudo pode ser usado como sistema auxiliar.

Helene (1993) alerta que esse método em alguns casos pode deslocar as pilhas de corrosão, protegendo apenas o trecho reparado da estrutura e acelerando o processo de corrosão das regiões adjacentes e inicialmente em bom estado.

Rilem (1994) *apud* Cabral sugere a total substituição do revestimento que contorna as armaduras, nas regiões em que foi verificado um teor elevado de cloretos, independente se as armaduras ainda não foram atingidas, o fechamento da abertura poderá ser feito com argamassas ou concretos de reparo. Ainda ressalta a ocorrência da redistribuição dos cloretos, na tentativa de fazer com que os teores próximos das armaduras sejam menores que o mínimo necessário para dar início a corrosão, se os cloretos forem originários do meio ambiente ainda é recomendável realizar uma pintura na face do concreto são e do reparado, afim de evitar futuras penetrações, esse método na maioria das vezes é meramente paliativo.

4.3.2.2 Sistema de reparo por inibição

De maneira complementar a definição de inibidores explicada no item 4.2.6, Rilem (1994) *apud* Cabral (2000) define os inibidores atuando na etapa de recuperação, ou seja, no concreto que irá recompor a estrutura, como substâncias que, quando acrescidas a um meio corrosivo de forma correta, em concentrações adequadas, promovem alterações locais na região metal-eletrólito, provocando redução da corrosão. Para Helene (1993) inicialmente, os inibidores protegem o trecho reparado e as regiões próximas ao reparo, somente.

Uchôa (2007) deixa claro que essa técnica faz parte de um conjunto de medidas que são usadas para diminuir a corrosão, trabalham em grupo com um bom projeto, boas escolhas de materiais, boa execução e um plano de manutenção coerente, dessa forma o inibidor terá seu efeito potencializado.

4.3.2.3 Sistema de reparo por barreira

Esse tipo de reparo normalmente é utilizado de forma complementar a outro método. Helene (1993) salienta que a penetração de íons cloretos podem ser evitada com a utilização de vernizes base epóxi, base acrílica e revestimentos de elevada espessura e resistência, com a finalidade de deixar a superfície do concreto com baixa permeabilidade.

Cabral (2000) ainda enfatiza que esses revestimentos só oferecem proteção contra a entrada de cloretos somente em concreto são e se eles forem aplicados em toda a superfície da estrutura, de forma a barrar o acesso do oxigênio.

4.3.3 Sistemas de reparo atuantes sobre a armadura

4.3.3.1 Sistema de reparo por barreira sobre a armadura

Esse sistema tem os mesmos princípios do sistema de reparo por barreira sobre o concreto, utilização de pinturas de baixa permeabilidade, com a finalidade de atuar como barreira física, diminuindo a possibilidade do ataque da frente de cloretos sobre o aço. Como esse sistema é aplicado diretamente sobre a armadura, também pode deslocar as pilhas de corrosão para as regiões próximas a área reparada.

4.3.3.2 Sistemas de reparo por proteção catódica

Conforme Cascudo (1997) existem dois métodos de proteção catódica, o método galvânico e o método por corrente impressa. Para estruturas de concreto o sistema mais usado é o por corrente impressa, pois as experiências com sistemas galvânicos produziram resultados insatisfatórios, desse modo é descrito o funcionamento de maneira resumida a seguir.

São utilizados sistemas de ânodos em forma de tela junto a superfície do concreto, cobre-se esse sistema com uma camada de concreto, é feita uma interligação do ânodo ao terminal positivo de um retificador de corrente e as armaduras são conectadas ao terminal negativo. Ao ser ligado é estabelecida uma diferença de potencial entre a região anódica e o aço, logo as armaduras ficam protegidas por funcionarem como cátodos, a corrente atravessa o revestimento de concreto chega as armaduras e retorna pelo ânodo do retificador, fechando o circuito. A Figura 21 ilustra o processo de funcionamento do sistema de proteção catódica.

Figura 21 – Ilustração do funcionamento do sistema de proteção catódica por corrente impressa



Fonte: Cascudo (1997, p. 104).

4.3.4 Procedimentos

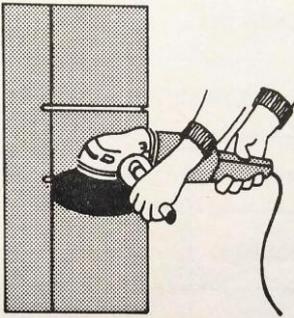
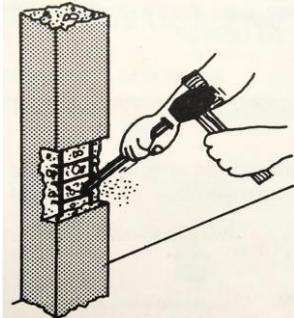
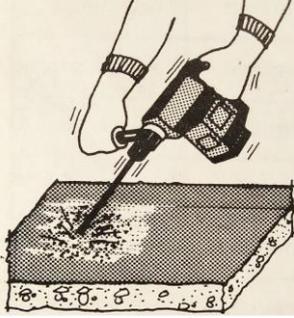
Os procedimentos para a recuperação de estruturas são vastamente discutidos na literatura por Souza e Rippier (2009), Helene (1992), Cascudo

(1997), Canóvas (1989), Piacanelli (1997), Lapa (2008) entre outros pesquisadores. Será descrito a seguir os procedimentos mais usados no reparo de estruturas degradadas por ação corrosiva devido aos íons cloreto.

Souza e Rippier (2009) orientam uma investigação precisa dos elementos deteriorados, da extensão das avarias, determinação da capacidade resistente residual da estrutura ou da peça, assim como a definição do tipo e extensão do reforço necessário, determinação ou não do uso de escoramentos, avaliação do grau de segurança da estrutura e a escolha da técnica de execução.

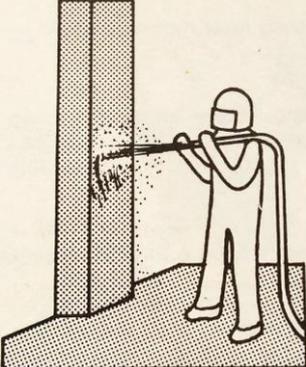
Para o reparo das estruturas, Helene (1992) recomenda processos para o preparo do substrato. Os Quadros 2 e 3 mostram um resumo desses procedimentos.

Quadro 2 - Quadro resumo dos procedimentos para preparo do substrato

Quadro resumo	
Disco de corte	Procedimento - Adequado para aço e concreto
	Manter o disco em posição ortogonal a superfície, tendo delimitado a área de execução antes do início do corte
	Desvantagens
	Requer o uso de mão de obra especializada e acessórios adequados, cuidado para não danificar estribos e armaduras não atingidas por cloretos.
Escarificação manual	Procedimento - Adequado para concreto
	A superfície deve ser escarificada de fora para dentro, deve ser retirado todo o material solto ou mal compactado até atingir o concreto são, propiciando uma superfície rugosa e coesa, para boas condições de aderência, prevendo cimbramento adequado, caso seja necessário
	Vantagens
	Baixo ruído e sem muita poeira e não exige mão de obra especializada
Escarificação mecânica	Procedimento - Adequado para o concreto
	A superfície deve ser escarificada de fora para dentro, de maneira a evitar o lascamento de arestas e cantos. Se tratando de superfícies planas deve-se remover a nata superficial e fornecer rugosidade ao concreto, deve ser retirado todo o material solto ou mal compactado até atingir o concreto são, propiciando uma superfície rugosa e coesa, para boas condições de aderência, prevendo cimbramento adequado, caso seja necessário
	Vantagens
	Alta produtividade e não requer mão de obra especializada
	Desvantagens
	Baixa produtividade para espessuras menores que 1cm

Fonte: Helene (1988, com adaptações)

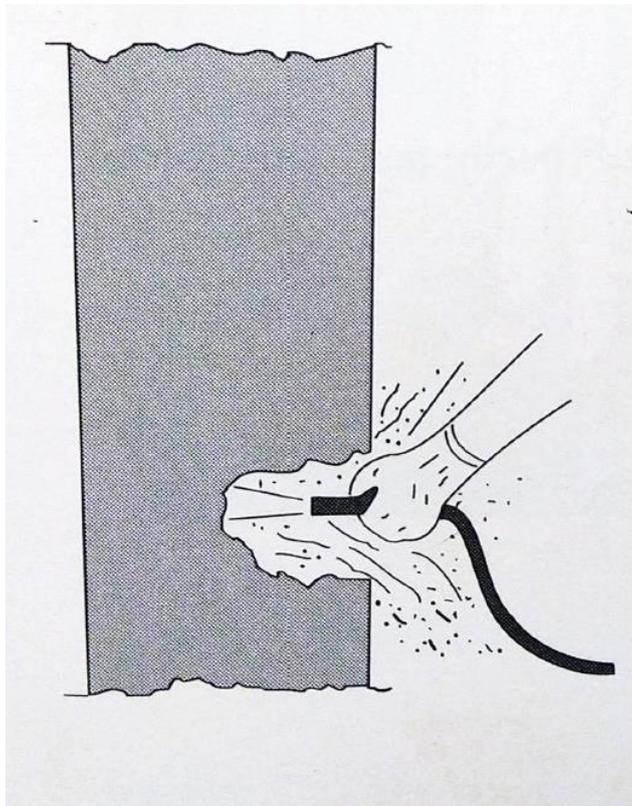
Quadro 3 - Quadro resumo dos procedimentos para preparo do substrato

Jato de areia úmido	Procedimento - Adequado para aço e concreto
	Manter o bico de jato em uma posição ortogonal à superfície de aplicação, a um metro de distância, o movimento deve ser feito em círculos, de maneira a distribuir o material uniformemente e remover todos os resíduos que prejudicam a aderência
	Vantagens
	Prepara as superfícies a serem recuperadas ou reforçadas, eliminando as partículas soltas e removendo o material que possa vir a prejudicar a aderência, permite a limpeza da armadura, eliminando as camadas corroídas e ausência de pó com o jato úmido
	Desvantagens
Não remove frações de espessura maiores que 3mm, em alguns casos, não dispensa a escarificação prévia.	
Disco de desbaste	Procedimento - Adequado para aço e concreto
	Aplicar o disco com lixa sobre a superfície, efetuando o desbaste em camadas ou passadas cruzadas a 90°, desbastar finas camadas por vez, mantendo a superfície uniforme
	Vantagens
	Alta produtividade
	Desvantagens
Requer mão de obra especializada	
Lixamento elétrico	Procedimento - Adequado para aço e concreto
	Manter a lixa paralela à superfície em tratamento, buscando efetuar movimentos circulares
	Vantagens
	Remove as impurezas existentes na superfície do concreto, abrindo e limpando os poros, remove a carepa de laminação e a crosta de corrosão superficial das chapas metálicas, permite a regularização da superfície e a remoção de eflorescências.
	Desvantagens
Provoca elevado grau de sujeira e poeira no ambiente, requer o uso de EPI's	

Fonte: Helene (1988, com adaptações)

Para a limpeza de superfícies, recomenda-se o jateamento de ar comprimido, já que ele pode ser utilizado com o concreto e o aço em condições secas ou úmidas. A Figura 22 ilustra o processo.

Figura 22 – Jateamento de ar comprimido para a remoção de pó



Fonte – Helene (1992)

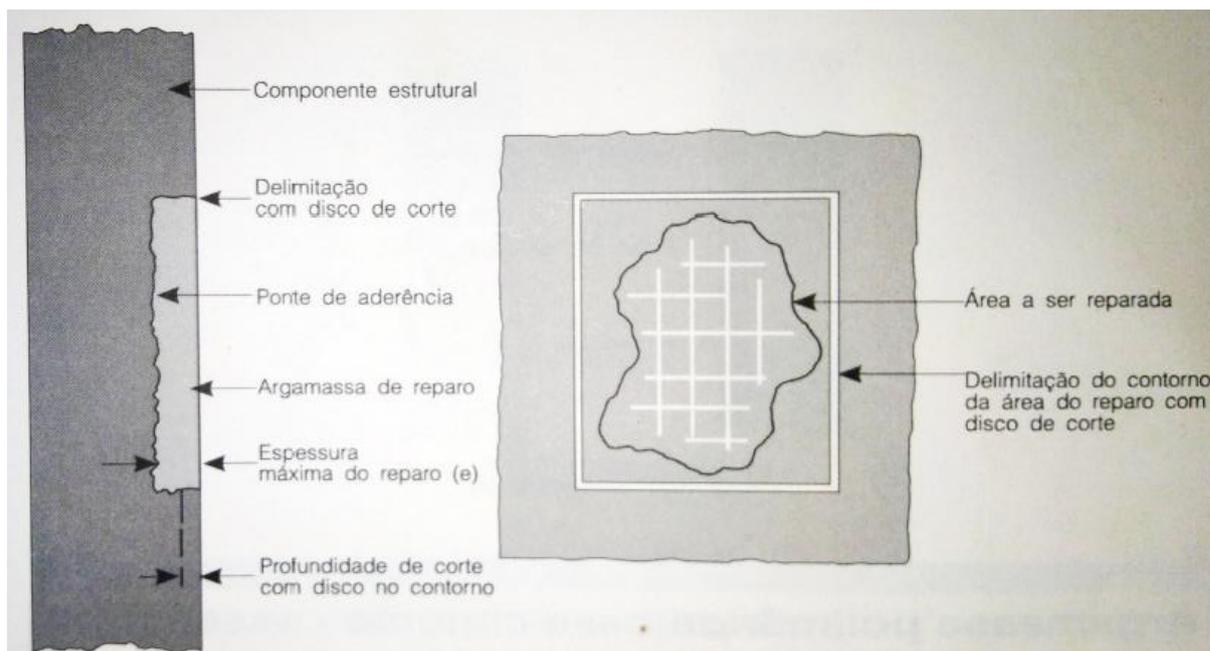
Cánovas (1989) e Helene (1997) dividem a colocação do novo concreto em reparos localizados e reparos em grandes áreas. Para reparos localizados, esses autores recomendam o emprego de argamassas de cimento Portland ou resina epóxi, colocadas pelo método tradicional, já para grandes áreas o concreto projetado ganha mais eficiência no processo. A técnica do concreto projetado consiste em conduzir, por uma mangueira, concreto ou argamassa, projetando-o em grande velocidade. O acabamento do concreto projetado se dá com uma desempenadeira. A técnica está representada na Figura 23. A Figura 24 representa a síntese de um dos tipos de procedimentos usados em reparos superficiais localizados em pequenas profundidades, sendo ela menor ou igual a 2,5 cm.

Figura 23 - Utilização da técnica do concreto projetado



Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Delimitação da área de reparo e execução do serviço em pequenas profundidades

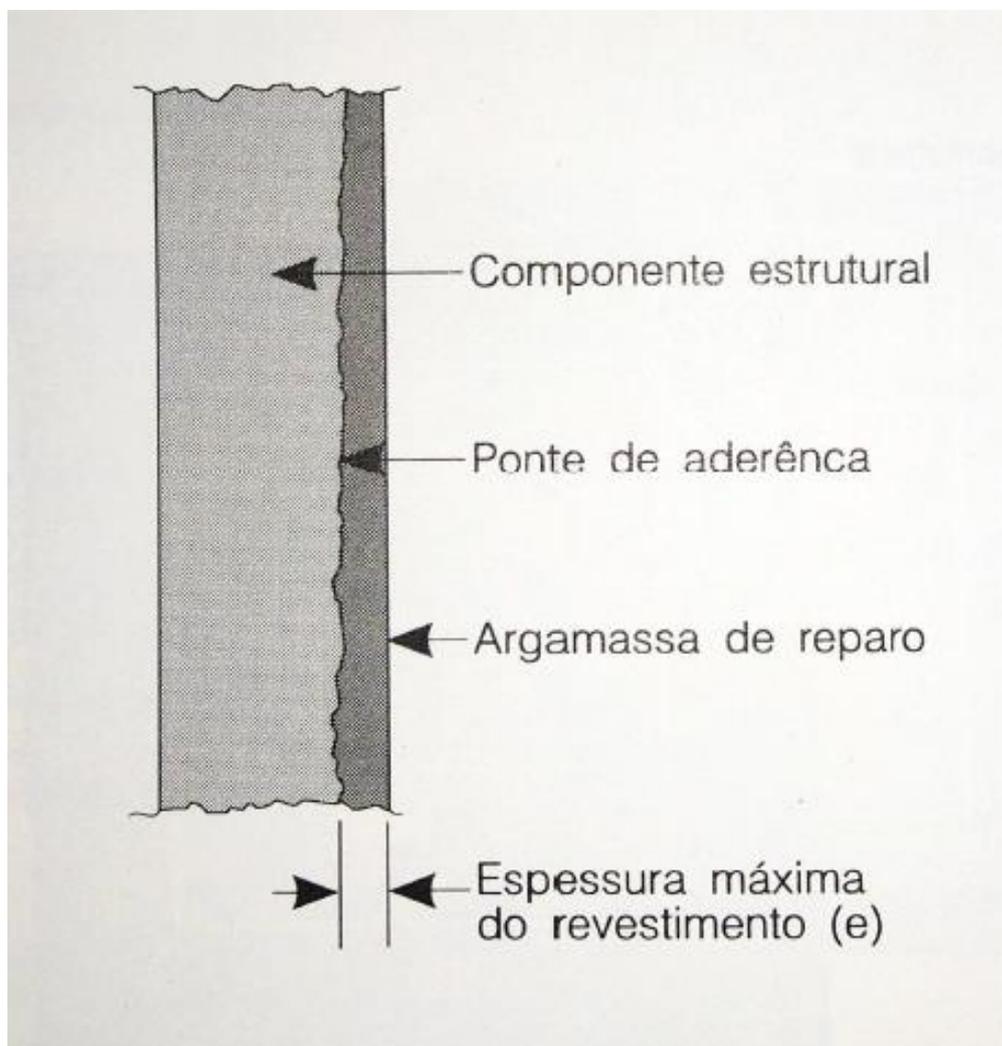


Fonte: Helene (1992)

Para pequenas áreas, a colocação pelo método tradicional consiste no emprego de formas de madeira e argamassa ou concreto colocados manualmente, podendo ser utilizada resina epóxi, para união dos concretos, ou calda de cimento, látex e areia, limitando a espessura de cada camada a 3,0 cm.

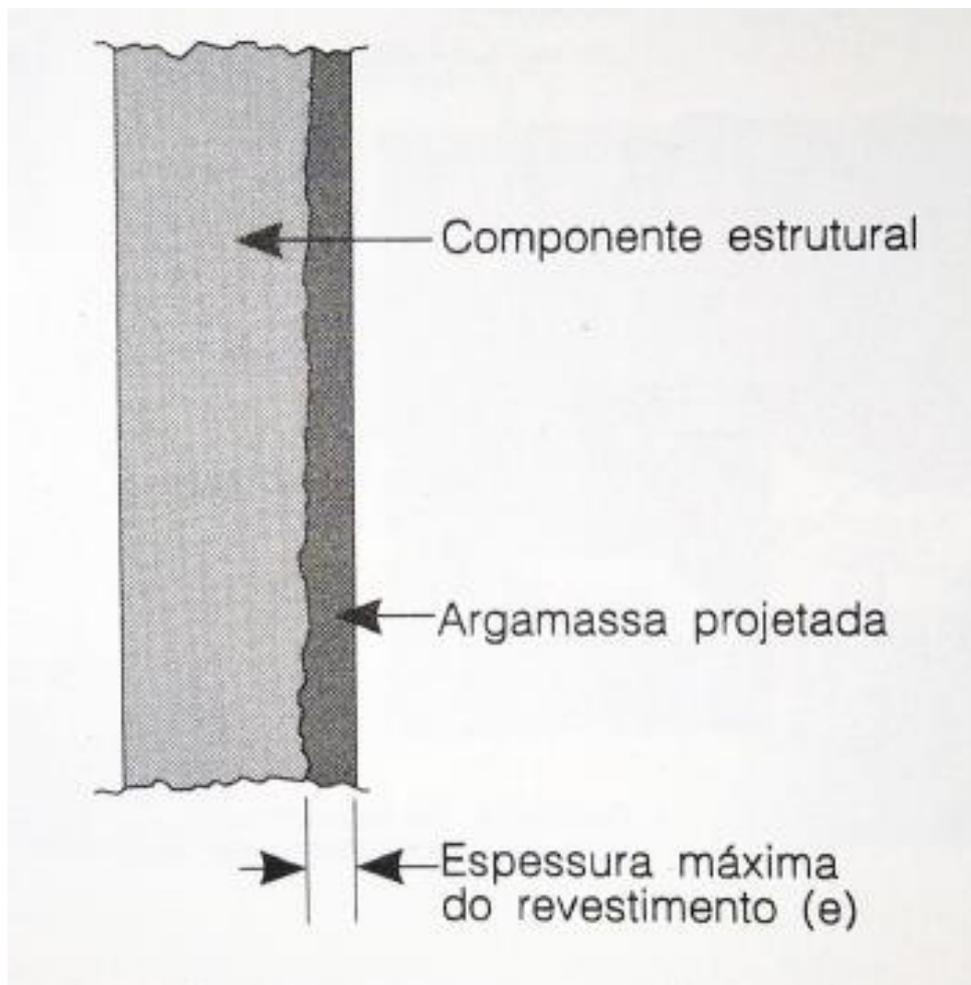
As Figuras 25 e 26 mostram a representação do procedimento de restauração da seção original em grandes áreas com pequena profundidade, uma com argamassa de reparo e a outra com concreto projetado.

Figura 25 – Representação de procedimento para reparos superficiais em grandes áreas



Fonte: Helene (1992)

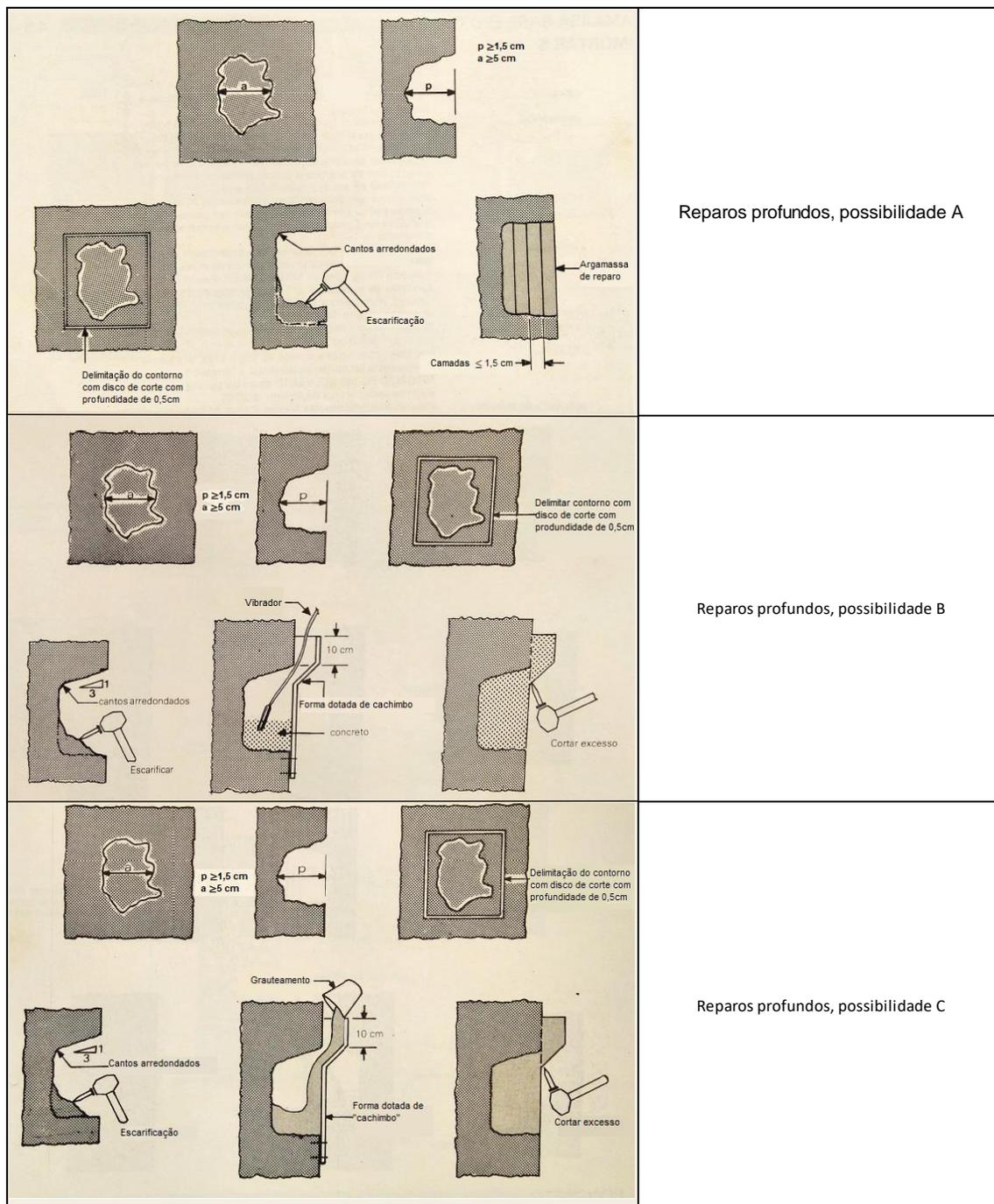
Figura 26 - Representação de procedimento para reparos superficiais com concreto projetado



Fonte: Helene (1992)

O Quadro 4 mostra diferentes tipos de procedimentos para o preenchimento em reparos profundos, o qual a profundidade de intervenção parte de 5,0 cm e normalmente atinge as armaduras. Alguns autores ainda citam o semi-profundo, no intervalo entre o 2,5 cm e 5,0 cm. O Quadro 4 ainda mostra opções de preenchimento, a depender da escolha do tipo de enchimento, argamassa de reparo, graute ou concreto.

Quadro 4 – Possibilidades de reparos profundos a depender dos materiais escolhidos



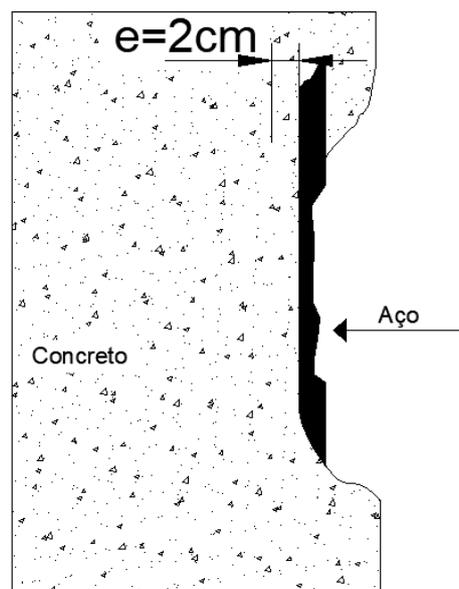
Fonte: Helene (1988, com adaptações)

Para a limpeza das armaduras e o preparo do substrato, Helene (1992) recomenda a limpeza das barras corroídas com jatos de areia úmidos, para grandes áreas, e lixamento ou escovamento manual para pequenas áreas.

O procedimento terá início a com a definição da área a ser tratada e prosseguirá com a remoção do concreto deteriorado. Souza e Ripier (2009) recomendam o corte do concreto sempre que houver corrosão do aço das armaduras, para garantir que estas estejam imersas em ambiente alcalino, por isso o corte deverá ir além das armaduras no mínimo 2,0 cm. Este é feito usualmente com jato d'água, discos de corte e ferramentas manuais. Cánovas (1989) recomenda a vedação de fissuras, se existirem, no concreto sanado com injeção de resina epóxi.

A Figura 26 mostra a profundidade do corte recomendado além da armadura, de forma a garantir a total imersão da barra em ambiente alcalino.

Figura 27 – Corte recomendado além da armadura para garantir ambiente alcalino para o aço

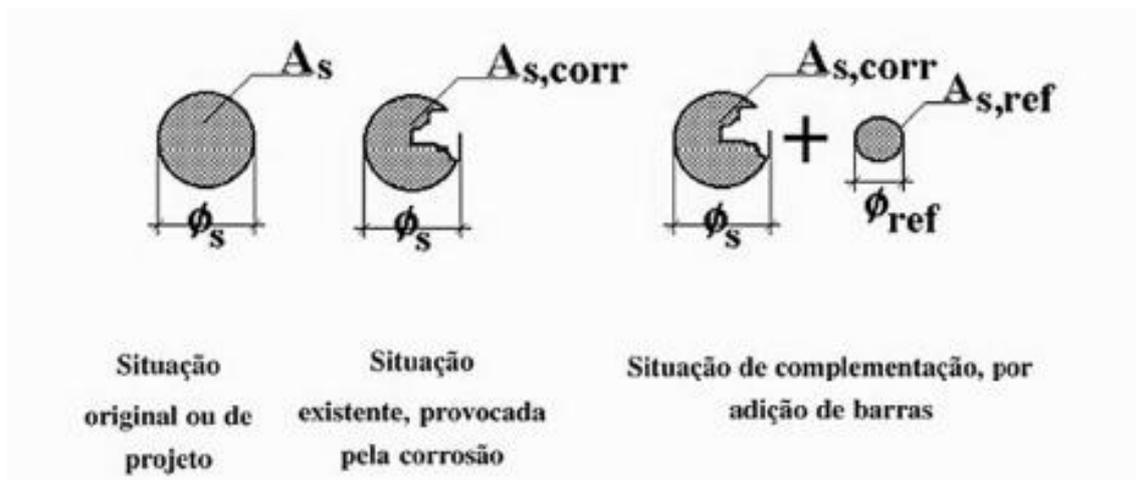


Fonte: Próprio autor

Após o exame das condições das armaduras, é feita uma análise para decidir ou não a necessidade de adição de novas barras de aço para recompor a área original. Souza e Ripier (2009) dividem os métodos de decisão para uma análise de barras isoladas e das barras totais que compõe a seção transversal da peça. O primeiro se a redução da seção da barra, ou somatório das áreas das barras, corroída tiver ultrapassado 15%. O segundo se o diâmetro equivalente da barra corroída tiver perdido 10% do seu diâmetro inicial. Esses limites são

bastante discutíveis, já que em alguns casos não devem ser utilizados, principalmente em situações críticas. A Figura 28 mostra o procedimento de recomposição da seção original de aço.

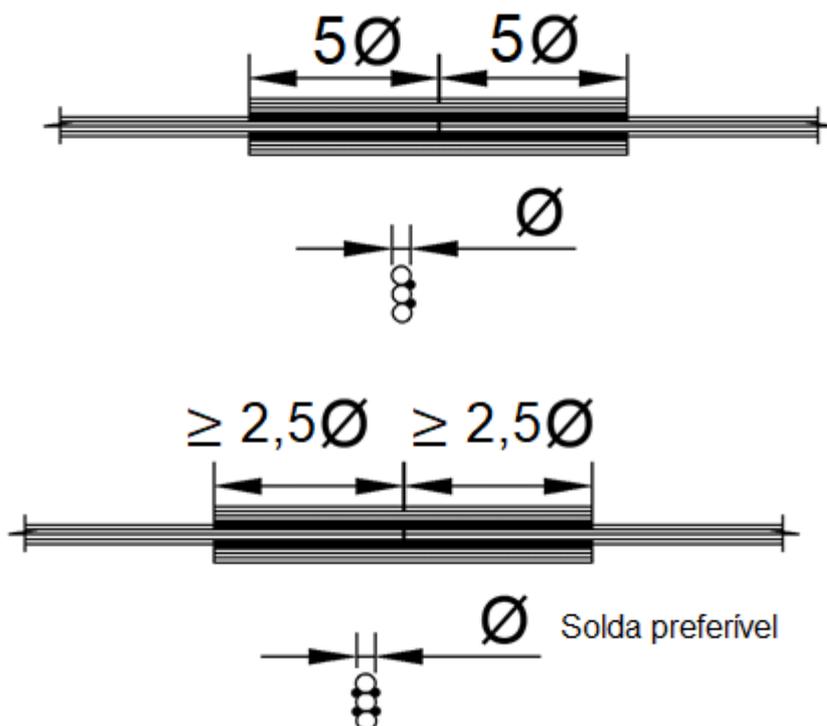
Figura 28 – Restituição da seção original de aço adicionando-se novas barras



Fonte: Souza & Rippier (2009, com adaptações)

Cánovas (1989) recomenda um traspasse de 10 diâmetros quando feito por solda e 40 diâmetros se for executado por amarração com arame. Souza e Rippier (2009) aconselham que, para a ancoragem com resina epóxi, a ancoragem poderá ser reduzida a 40% do comprimento de ancoragem calculado (l_b) e, caso se use graute, a ancoragem é reduzida a 70% do comprimento de ancoragem calculado (l_b). Helene (1992) recomenda diferentes comprimentos de solda, a depender da escolha do executante. A Figura 29 representa a extensão de solda recomendada por Helene (1992) para garantir a transmissão de esforços.

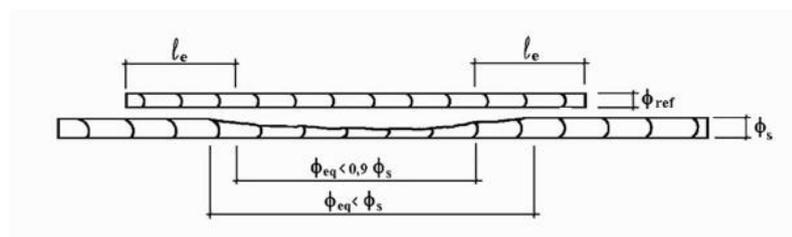
Figura 29– Emenda por solda aceitável e a recomendada



Fonte: Helene (1992)

A Figura 30 mostra o procedimento ancoragem de uma barra nova em uma barra danificada, recompondo a seção original. O “ l_e ” é o comprimento de ancoragem equivalente a depender do material cimentício utilizado para a ancoragem.

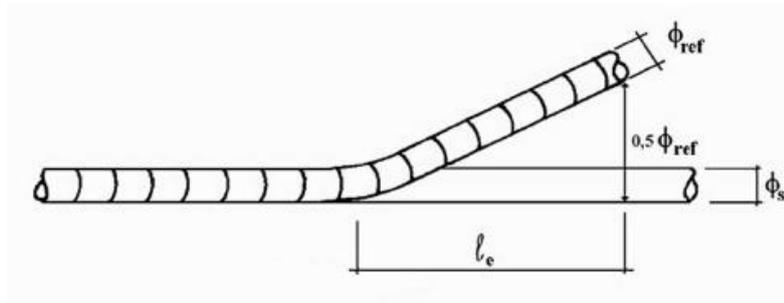
Figura 30 – Emenda entre as barras remanescentes e as complementares



Fonte: Souza & Rippier (2009)

A figura 31 mostra uma recomendação para otimizar a mobilização do concreto envolvente à armadura.

Figura 31– Pequena inclinação das barras são recomendadas para a mobilização contributiva do concreto envolvente



Fonte: Souza & Rippier (2009)

Após a limpeza das armaduras deverá ser aplicada tanto no aço como no concreto uma camada de resina epóxi, de forma a melhorar a aderência com o concreto novo e criar uma região mais impermeável. O lançamento do novo concreto deverá ser feito com a camada de adesivo ainda fresca, já que, se a concretagem for feita com a camada seca, não haverá aderência entre os concretos. O lançamento do novo concreto poderá ser feito com as mesmas técnicas já apresentadas, como concreto projetado e o método tradicional, com a utilização de formas.

CAPÍTULO 5

5.1 Conclusões

Os conceitos apresentados como vida útil, durabilidade, desempenho e as patologias causadas pela ação dos cloretos na estrutura, são princípios básicos para o entendimento da importância de um projeto bem planejado, detalhado e coerente em relação ao ambiente em que a estrutura está inserida.

O trabalho em equipe, proprietário, projetista, construtor e usuário, além do monitoramento do comportamento da estrutura são essenciais para o acúmulo de informações e servem para fundamentar o momento de uma manutenção preventiva. Todas as instruções quanto as atividades que devem ser executadas durante a vida útil da estrutura devem estar contidas no manual. Dessa forma essas ações irão atuar conjuntamente com o atendimento aos requisitos de qualidade e desempenho que foram corretamente especificados e acompanhados no processo de construção da obra.

A compreensão dos mecanismos de atuação dos íons cloretos sobre a estrutura são elementos básicos tanto para a elaboração de um projeto, como a elaboração de um reparo estrutural. Para a recuperação da parcela deteriorada é fundamental um correto diagnóstico com a finalidade de indicar a terapia mais adequada.

Geralmente é observado que mais de uma técnica de recuperação pode ser adotada, cabe ao Engenheiro Civil sempre estar atualizado sobre as técnicas e os materiais mais recentes, já que além de existirem poucos dados sobre as performances dos materiais ao longo do tempo, o comportamento das estruturas recuperadas ainda é rodeado de incertezas, como as interações físicas e químicas com o ambiente, ou seja, fatores externos à estrutura, revelando a vasta possibilidade de desenvolvimento de novas pesquisas na área.

Desse modo, fatores como a urgência da recuperação, os custos, a possibilidade de suspensão do uso da estrutura durante o tempo do reparo ou até que a estrutura possa ser colocada sob carga, além das condições ambientais que a peça está inserida ditam as técnicas que devem ser utilizadas.

De maneira conclusiva, foi desenvolvido a partir de contribuições de diversos pesquisadores, algumas recomendações para o projeto e a recuperação de estruturas de concreto armado em Fortaleza, obtendo uma visão ampla do processo construtivo de estruturas duráveis.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Realizar um estudo de caso relacionado a recuperação de estrutura de alguma construção localizada na orla de Fortaleza.

Realizar a comparação de custos com diferentes técnicas de reparo, para uma mesma obra, usando o LCC (Life cycle costs).

Avaliar a eficiência de sistemas de proteção do concreto contra a penetração de cloretos na região da Praia do Futuro.

5.3 Referências Bibliográficas

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à prevenção da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por Cloretos.** (Tese de doutorado) UFRGS, Porto Alegre, 2001. 256 p.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco.** (Dissertação de Mestrado). UFRS, Porto Alegre, 1997. 148 p.

ALBUQUERQUE, Augusto; OTOCH, Sérgio. Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005, Recife. **Anais...** . Recife: Ibracon, 2005. p. 1 - 6.

BORBA JÚNIOR, José Carlos. **Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste.** 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufes, Vitória, 2011.

BRANDÃO, Ana Maria da Silva. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado - Aspectos relativos ao projeto.** 1998. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação dos sistemas de reparo utilizados em estruturas atacadas por cloretos através da resistência de polarização.** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CAMPOS, A. M. R. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE. por cloretos através da resistência de polarização.** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CÁNOVAS, Manuel Fernanéz. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1988. 522 p.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**: Inspeção e técnicas eletroquímicas. 1. ed. Goiânia: UFG, 1997. p. 39-61.

CASTRO, Eliane Kraus de. **Desenvolvimento de Metodologia para manutenção de Estruturas de Concreto Armado**. 1994. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1994.

EURO-INTERNATIONAL COMMITTEE FOR CONCRETE. **CEB - FIP MC 90**: Design Code. Londres: Thomas Telford, 1990. 461 p.

FITZGERALD, J.W. Marine aerosols: a review. *Atmospheric Environment*, v. 25A, N.3/4, p. 533-545, 1991.

GJØRV, Odd E.. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HELENE, Paulo Roberto; GUIMARÃES, André T C; CASTAGNO JÚNIOR, Roger. Intensidade de ataque de cloretos: considerações sobre a distância do cloreto em relação à água do mar. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. São Paulo, p. 73-79. Não é um mês valido! 2003.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Usp, São Paulo, 1993.

Intensidade de ataque de cloretos: considerações sobre a distância do concreto em relação à água do mar. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 73-79, jun./2003.

LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. 56 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Ufmg, Belo Horizonte, 2008.

LIAUW, C. T. Influence of seawater on reinforced concrete buildings, *Build. Sci.*, v. 9, p. 125-130, Great Britain, 1974.

LIMA, Maryangela Geimba de; LENCIONI, Julia Wippich. A problemática da corrosão e da durabilidade das construções em ambientes agressivos - o caso

do ambiente marinho urbano e das estruturas de concreto. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS DA UNAERP CAMPUS GUARUJÁ, -, 2014, Guarujá. **Simpósio**. Guarujá: Unaerp, 2014. p. 1 - 16.

Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992. p. 27-60.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira, HELENE, Paulo R. L. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 22.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnósticos e prevenção**. João Pessoa: Ifpb, 2017.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. **Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte: IBRACON, 2002, 1 CD-ROM.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, M. C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA JR., J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. *Cement and concrete Composites*, 29, 2007, p. 667- 676.

MEHTA, P Kumar; MONTEIRO, Paulo J M. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MOLIN, Denise C C dal; SILVESTRO, Laura. Avaliação de modelos para previsão de vida útil de estruturas de concreto armado localizadas em ambientes com cloretos. In: CONFERÊNCIA SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS, 6., 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** . Porto Alegre: Nppg, 2018. p. 1 - 10.

MORAES FILHO, José Edival. **Avaliação da resistência do concreto ao meio ambiente em estrutura de concreto do porto do Recife: estudo de caso**. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2013.

OH, B. H., ed. lit. – “Concrete under severe conditions : environment and loading : proceedings of the Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions, 4, Seoul, Korea, 2004”. [Seoul]: Seoul National University : Korea Concrete Institute, 2004. ISBN 89-89499-02-X. vol. 1. p. 441-448.

Patologia e Terapia do Concreto Armado. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988. p. 383-394.

Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998. p. 1-161.

PIAZZOLA, J. DESPIAU, S. Contribution of marine aerosol in the particle size distribution observed in Mediterranean coastal zone. Atmospheric Environment, v. 18, p. 2991-3009, 1997.

PONTES, Ronaldo Bezerra. **Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife-PE.** 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2006.

PORTELLA, Caio Sander Andrade. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos segundo a ABNT 6118:2007 e expostos aos cloretos disseminados em névoa salina na Praia do Futuro, em Fortaleza-CE.** 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufc, Fortaleza, 2013.

Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2015. p. 50-170.

Propriedades do concreto. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. p. 481-560.

R. F. Lovett (1978) Quantitative measurement of airborne sea-salt in the North Atlantiv, Tellus, 30:4, 358-364, DOI: 10.3402\tellusa.v30i4.10354.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado.** 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SANTOS, Aleilson. CORROSÃO DE ARMADURA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DEVIDO A CARBONATAÇÃO. Salvador (ba): Ipog,

2015. Disponível em: <<https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n10-2015/corrosao-de-armadura-em-estruturas-de-concreto-armado-devido-a-carbonatacao/>>. Acesso em: 02 abr. 2019.

SANTOS, Davi Valente; SILVA, David Alisson Araujo; CABRAL, Atônio Eduardo Bezerra. Avaliação de teor de íons cloro no ar atmosférico da praia do Porto das Dunas, em Aquiraz/CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Fortaleza. **Avaliação de teor de íons cloro no ar atmosférico da praia do Porto das Dunas, em Aquiraz/CE**. Fortaleza: Ibracon, 2014. p. 1 - 12.

SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. 1994. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrgs, Porto Alegre, 1994.

VIEIRA, Fernanda Macedo Pereira. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. 2003. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrgs, Porto Alegre, 2003.

VILASBOAS, José Marcílio Ladeia. **Estudo dos mecanismos de transporte de cloretos no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade do Salvador-BA**. 2013. 323 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Ufba, Salvador, 2013.