

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



LUCAS ALMEIDA DE QUEIROGA

**COMPARAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO
ESTIMADA POR MODELO MATEMÁTICO COM A EXISTENTE
NO SISTEMA ESTRUTURAL DO IFPB – *CAMPUS CAJAZEIRAS***

Cajazeiras
2018

LUCAS ALMEIDA DE QUEIROGA

**COMPARAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO
ESTIMADA POR MODELO MATEMÁTICO COM A EXISTENTE
NO SISTEMA ESTRUTURAL DO IFPB – *CAMPUS CAJAZEIRAS***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Daniel Torres Filho

Cajazeiras
2018



**Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia
Paraíba**

Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

Queiroga, Lucas Almeida de

Comparação de profundidade de carbonatação estimada por modelo matemático com a existente no sistema estrutural do IFPB-Campus Cajazeiras / Lucas Almeida de Queiroga; orientador Daniel Torres Filho.- 91 f.: il.

Orientador: Daniel Torres Filho.
TCC (Bacharelado em Eng. Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2018.

1 Concreto 2 Carbonatação 3 Corrosão I. Título.

620.19 Q3c

LUCAS ALMEIDA DE QUEIROGA

**COMPARAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO
ESTIMADA POR MODELO MATEMÁTICO COM A EXISTENTE NO
SISTEMA ESTRUTURAL DO IFPB – *CAMPUS CAJAZEIRAS***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Nome do orientador – Daniel Torres Filho
Unidade Acadêmica da Área de Indústria do IFPB – Campus Cajazeiras.

Nome do membro – Gastão Coelho de Aquino Filho
Unidade Acadêmica da Área de Indústria do IFPB – Campus Cajazeiras.

Nome do membro – Sebastião Simão da Silva
Unidade Acadêmica da Área de Indústria do IFPB – Campus Cajazeiras.

Cajazeiras, 18 de outubro de 2018

Dedico este trabalho aqueles que, além de me darem a vida, também me ensinaram como vivê-la, meus pais João e Geralda.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente Àquele que permitiu que tudo isso fosse possível, que abriu minha mente para buscar meu sonho e saber conquistá-lo, o engenheiro do universo, Deus.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, em especial ao *Campus* Cajazeiras, que se tornou uma segunda casa durante cinco anos da minha vida e que tornou possível a realização dessa pesquisa. A todo o corpo docente do *campus*, pela contribuição em minha formação e na realização desse sonho, como também à direção pelo apoio por todos esses anos, além de um obrigado especial a Gastão Coelho, pelas orientações prestadas.

Ao meu orientador, professor Daniel Torres Filho, por todos os ensinamentos, tanto de caráter técnico como profissional, além de todo o auxílio e paciência cedidos para a realização deste trabalho.

Aos constituintes da banca examinadora pela cooperação no aprimoramento da pesquisa.

Aos meus pais João e Geralda, que são meu orgulho e, ao mesmo tempo, minha inspiração para também proporcionar esse sentimento neles. Também a minha irmã, que é uma parte de mim em que posso me amparar.

À toda minha família, em especial a minha avó Artemiza, por todas as orações a mim dirigidas. Também aqueles que me apoiam desde o início, meus primos Maiky e Francilanno, que estiveram comigo em todas as fases da minha vida, me sustentando para sair de cada uma delas com cabeça erguida, e essa não foi diferente.

Aquela que foi uma das inspirações mais fortes, quem eu podia confiar para recuperar as energias e o ânimo para continuar. Aquela que sempre tinha as palavras certas nos momentos de insegurança e que foi essencial na minha determinação, minha namorada Iara.

Ao grupo de estudos “Come Keto”, nas pessoas de Antonia Luíza, Heberton Linhares, Jorge Lucas, José Neto e Mayza Ornella, por se tornarem, além de colegas fieis, amigos de inestimável valor que vou levar comigo por toda a existência além dos maiores incentivadores deste trabalho.

Também a todos os amigos que o IFPB proporcionou que entrassem em minha vida, todos são importantes e participaram nessa conquista.

Enfim, a todos que, de alguma forma, seja direta ou indiretamente, contribuíram na execução dessa obra, meus agradecimentos mais sinceros.

RESUMO

Uma das patologias de maior frequência nas obras de engenharia é a corrosão da armadura presente no concreto armado, que pode surgir devido à perda da passivação da armadura em função da diminuição do pH do concreto causado pela sua carbonatação. Para combater e principalmente prevenir esse efeito indesejável, alguns estudos na área têm avançado satisfatoriamente, gerando uma série de modelagens matemáticas que auxiliam o projetista na tomada de decisões. O presente estudo se baseou na comparação de resultados fornecidos pelo software chamado Carambola, que fornece a previsão do avanço da carbonatação em concretos de acordo com as características em estudo, com o concreto que compõe o sistema estrutural do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – *Campus* Cajazeiras. Os resultados puderam comprovar que o avanço da carbonatação no concreto estudado foi maior que o obtido através da simulação realizada no programa.

Palavras-Chave: Concreto; Carbonatação; Corrosão.

ABSTRACT

One of the most frequent pathologies in engineering works is the corrosion of the reinforcement in reinforced concrete, which can arise due to the loss of the passivation of the reinforcement due to the decrease of the pH of the concrete caused by its carbonation. In order to combat and mainly prevent this undesirable effect, some studies in the area have advanced satisfactorily, generating a series of mathematical models that assist the designer in making decisions. The present study was based on the comparison of results provided by the software called Carambola, which provides the prediction of the advance of carbonation in concretes according to the characteristics under study, with the concrete that composes the structural system of the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) - *Campus* Cajazeiras. The results showed that the carbonation advance in the concrete studied was higher than that obtained through the simulation performed in the program.

Keywords: Concrete; Carbonation; Corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Morfologia da corrosão.....	25
Figura 2 - Diagrama simplificado de Pourbaix para o Fe a 25°C.....	27
Figura 3 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982).....	30
Figura 4 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras.....	32
Figura 5 - Modelo proposto por Figueiredo e Meira (2013), adaptado do modelo de Tuutti (1982).....	33
Figura 6 - Modelo de vida útil formulado por Mehta (1994).....	33
Figura 7 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo em função do teor de CO ₂	37
Figura 8 - Influência do tipo de cimento na carbonatação natural do concreto.....	38
Figura 9 - Ponto de viragem da fenolftaleína.....	42
Figura 10 - Avanço do processo de carbonatação.....	44
Figura 11 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.....	48
Figura 12 - Exemplos de variação da espessura carbonatada com a resistência do concreto, o consumo de cimento, a relação água/cimento e a umidade do ambiente.....	49
Figura 13 - O levantamento mostra fissura paralela à armadura do pilar.....	56
Figura 14 - Fissuração na base do pilar com configuração paralela à armadura.....	56
Figura 15 - Identificação de desagregação do concreto na base do pilar.....	57
Figura 16 - Caso de expulsão do concreto, exposição da armadura e cobrimento inadequado.....	57
Figura 17 - Exposição da armadura após expulsão do concreto de cobrimento.....	58
Figura 18 - Restauração com notória distinção entre o concreto original e o de restauração.....	59
Figura 19 - Abertura de fissuras em pilares recuperados.....	59
Figura 20 - Corrosão da estrutura do reservatório.....	60
Figura 21 - Fissuração e cobrimento inadequado na estrutura do reservatório.....	60
Figura 22 - Aplicação de zarcão no processo de restauração de pilar do IFPB – <i>Campus Cajazeiras</i>	63
Figura 23 - Pilar Fissurado 1 (PF1).....	65
Figura 24 - Pilar Não Fissurado 1 (PNF1).....	65

Figura 25 - Pilar Não Fissurado 2 (PNF2).....	66
Figura 26 - Pilar Restaurado (PR)	66
Figura 27 - Reparação feita no PR em dezembro de 2015	67
Figura 28 - Localização das amostras escolhidas para realização dos ensaios	67
Figura 29 - Utilização do pacômetro para localização da armadura	68
Figura 30 - Marcação do posicionamento da armadura por meio do pacômetro e de caneta ..	69
Figura 31 - Marcação da armadura realizada em pilar	69
Figura 32 - Abertura de furo com auxílio de ponteira, talhadeira e marreta	70
Figura 33 - Aplicação de solução de fenolftaleína na área de desagregação do concreto no PF1	71
Figura 34 - Verificação da concentração de CO ₂ no ar por meio de medidor eletrônico.....	72
Figura 35 - Tela principal do software Carambola.....	73
Figura 36 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF1, furo a 18 cm do piso.....	77
Figura 37 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF1, furo a 120 cm do piso.....	77
Figura 38 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF2, furo a 49 cm do piso.....	78
Figura 39 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF2, furo a 149 cm do piso.....	79
Figura 40 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF1, furo a 41 cm do piso.....	81
Figura 41 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF1, furo a 146 cm do piso.....	81
Figura 42 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF2, furo a 64 cm do piso.....	82
Figura 43 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF2, furo a 153 cm do piso.....	82
Figura 44 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PR, furo a 72 cm do piso	84
Figura 45 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PR, furo a 62 cm do piso	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados referentes aos Pilares Fissurados	79
Tabela 2 - Cálculo da profundidade estimada de carbonatação para os Pilares Fissurados	80
Tabela 3 - Resultados referentes aos Pilares Não Fissurados.....	83
Tabela 4 - Cálculo da profundidade estimada de carbonatação para os Pilares Não Fissurados	83
Tabela 5 - Resultados referentes ao Pilar Restaurado	85

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C₂S – Silicato Dicálcico

C₃S – Silicato Tricálcico

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CaCO₃ – Carbonato de Cálcio

CO₂ – Dióxido de Carbono

CPI – Cimento Portland Comum

CPIII – Cimento Portland de Alto Forno

CPIV – Cimento Portland Pozolânico

CPV – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CSH – Silicato de Cálcio Hidratado

CV – Coeficiente de Variação

DAPF – Diretoria de Administração, Planejamento e Finanças

Fe(OH)₂ – Hidróxido de Ferro II

Fe(OH)₃ – Hidróxido de Ferro III

Fe₂O₃ nH₂O – Óxido de Ferro Hidratado

H₂S – Gás sulfídrico

IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

KOH – Hidróxido de Potássio

NaOH – Hidróxido de Sódio

NBR – Norma Brasileira

PF – Pilar Fissurado

PNF – Pilar Não Fissurado

PR – Pilar Restaurado

SO₂ – Dióxido de Enxofre

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

% – por cento

cm – centímetro

G – função limite de probabilidade

g – função reduzida de probabilidade

mm – milímetro

MPa – megaPascal

mV – miliVolt

°C – grau Celsius

pH – potencial hidrogeniônico

V – Volt

μ – média

$\mu\text{A}/\text{cm}^2$ - microampere por centímetro quadrado

μm – micrometro

σ – desvio padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	16
1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 JUSTIFICATIVA	19
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 CORROSÃO	21
2.1.1 Despassivação da Armadura.....	26
2.1.2 Vida Útil de Estruturas em Relação a Corrosão	29
2.1.3 Fatores que Aceleram a Corrosão.....	34
2.1.3.1 Umidade	34
2.1.3.2 Temperatura	35
2.1.3.3 Macrocélulas de Corrosão	36
2.1.3.4 Teor de Agentes Agressivos no Ambiente	37
2.1.3.5 Características do Concreto.....	38
2.1.4 Efeitos da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado.....	39
2.2 CARBONATAÇÃO	41
2.2.1 Ação da Carbonatação	41
2.2.2 Variáveis Importantes no Processo de Carbonatação.....	45
2.2.3 Métodos de Previsão de Carbonatação	52
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	55

3.1 VISTORIA DO LOCAL	55
3.2 ANAMNESE DO CASO	61
3.3 ENSAIOS REALIZADOS	63
3.3.1 Escolha dos Pilares para Estudo	64
3.3.2 Execução dos Furos	67
3.3.3 Ensaios	70
3.3.4 Aplicação do Método de Previsão de Carbonatação	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1 PILARES FISSURADOS	76
4.2 PILARES NÃO FISSURADOS	80
4.3 PILAR RESTAURADO	84
5 CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

A ânsia de construir do ser humano nasceu a partir do momento no qual percebeu a necessidade de se abrigar em um local seguro e protegido das adversidades. A partir daí, deu-se início a um longo processo de aperfeiçoamento de técnicas construtivas, que ainda hoje se encontra em intenso avanço. Diariamente novas tecnologias vêm sendo elaboradas com o intuito de aumentar a rapidez e qualidade das obras, sempre respeitando os limites da segurança e economia.

Lichtenstein (1986) afirma que com o surgimento da necessidade de construir, veio também a preocupação com a qualidade dessas obras, que, se executadas e utilizadas de forma indevida, têm consequências desconfortáveis para construtores e usuários. Dessa forma, dois conceitos têm chamado muita atenção de engenheiros e arquitetos: durabilidade e desempenho. Esses conceitos caracterizam o comportamento de uma determinada estrutura, com base em um tempo pré-estipulado, a vida útil de projeto.

Com base nesses aspectos, surgiu o ramo da Patologia das Construções, que estuda as diversas manifestações patológicas que podem ocorrer nas edificações, analisando principalmente a identificação, as causas e os métodos mais eficazes de intervenção dessas falhas.

Esses problemas podem ter diferentes causas, que se originam nas mais diversas etapas de um empreendimento. Erros nas fases de projeto, escolha de materiais, execução e até mesmo de utilização, podem acarretar transtornos futuros que poderiam ser evitados facilmente através de decisões simples como, por exemplo, Pina (2013) diz que um aumento na espessura de cobrimento do concreto armado de 2,0 para 2,5 cm, aumenta em 56% a vida útil da armação.

Diante dos inúmeros problemas surge o grande desafio de simplificar os métodos de identificação das mais diversas manifestações que podem ocorrer em uma determinada obra, através de metodologias de levantamento de subsídios e execução de ensaios, tendo em vista a complexidade de interação dos diferentes materiais que são utilizados no processo construtivo.

Sem dúvidas, o principal material e que gera mais preocupação quanto a sua durabilidade é o concreto armado. Tendo em vista sua ampla utilização, sendo o segundo material mais consumido pela humanidade hoje, atrás apenas da água, o concreto desempenha uma das funções mais importantes na edificação: a de segurança estrutural. Por isso significativa atenção deve ser direcionada a esse material. Por se tratar de um material composto, os seus constituintes podem interagir com o ambiente, como também com os

próprios constituintes entre si, sendo muitas vezes complexo o diagnóstico das manifestações patológicas.

Por muito tempo, o concreto armado foi considerado um material de durabilidade infinita, entretanto o aparecimento de problemas nas antigas construções acabou gerando dúvidas a respeito desse pensamento. Sabendo da influência do ambiente no surgimento das patologias, se faz necessário um estudo sobre a influência do meio externo nas propriedades de durabilidade dos materiais, principalmente o concreto estrutural.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Diante da diversidade de materiais e técnicas construtivas que são necessárias para a execução de um empreendimento, inúmeras são também as complicações que podem surgir mediante erros nas diversas fases de execução incidindo na vida útil de projeto. Essas complicações aparecem na forma de patologias e podem englobar os variados sistemas existentes: alvenaria, revestimento, impermeabilização, instalações hidrossanitárias e elétricas e o sistema estrutural.

Em termos de sistema estrutural existe uma diversidade de materiais que podem ser utilizados, tais como o aço, a madeira e o concreto, sendo esse último o mais utilizado.

Tendo em vista a complexidade na interação dos materiais, o concreto armado é um material sensível ao surgimento de patologias, sendo inúmeros os tipos de problemas que podem ocorrer envolvendo cada um dos seus constituintes (aglomerante, água, areia e brita). Além disso, levando em consideração que os agentes agressivos contidos no meio ambiente são os principais responsáveis pelo aparecimento dessas manifestações patológicas, o concreto armado pode receber proteção de outros sistemas construtivos como o impermeabilizante, que impede o contato excessivo com a umidade, o revestimento, que envolve a peça de concreto funcionando como uma barreira física e a alvenaria que, através de detalhes arquitetônicos pode influenciar no contato da estrutura com o meio. Entretanto, esses itens nem sempre estão presentes, como em situações de concreto aparente, em que os cuidados relativos à proteção do elemento estrutural devem ser ampliados, uma vez que a proteção se dá apenas pelo próprio concreto.

No que se refere às patologias que podem surgir no concreto armado, a corrosão de armaduras chama atenção por se tratar de um problema que é frequentemente presente nas obras de engenharia e que demanda altos custos de reparação. Esse problema atinge diretamente o

aço no interior do concreto, causando sua deterioração e tendo como consequências a redução da seção transversal da barra e a produção de elementos expansivos como efeito da corrosão. Esse efeito expansivo dos produtos da corrosão provoca tensões no concreto, resultando na fissuração e destacamento do revestimento.

Entretanto, para que se dê início o processo de corrosão, se faz necessário antes que a armadura esteja quimicamente desprotegida. Essa perda de proteção da armadura é efeito da carbonatação, que ocorre por meio da interação de compostos alcalinos presentes na matriz do cimento e o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera. Essa reação tem como consequência a diminuição do pH no interior do concreto desfazendo a proteção química da barra, deixando o aço vulnerável à corrosão.

Tendo em vista o surgimento de problemas patológicos, medidas preventivas devem ser adotadas de forma a garantir a durabilidade da estrutura dentro da sua vida útil.

Diversos pesquisadores estudam métodos para prever o tempo de vida útil de uma estrutura, com base em algum problema que venha a pôr um fim a esse período. No caso da corrosão de armaduras, a previsão de carbonatação por meio de modelos matemáticos é o objetivo de abundantes estudos da comunidade científica. Esses modelos têm como propósito, estipular o prazo até que a frente de carbonatação alcance a armadura. Um desses pesquisadores é Carmona (2005) que fez uma análise das metodologias existentes para previsão de carbonatação e concluiu com o desenvolvimento de um software que auxilia nesse cálculo, tendo como base o modelo mais eficaz observado por ele, que foi o elaborado por Helene (1997). A utilização desse software auxilia na previsão do tempo até que a carbonatação atinja a armadura, contribuindo no planejamento das manutenções necessárias e na verificação do comportamento da estrutura.

1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A deficiência na qualificação profissional é um problema presente no Brasil desde muito tempo. Com o passar dos anos, o interesse pela capacitação técnica vem ganhando destaque, principalmente em se tratando de cursos técnicos, que são voltados exclusivamente para o rápido ingresso do indivíduo no mercado de trabalho. Esse fenômeno começou a ganhar força principalmente devido a implantação de diversas escolas profissionalizantes, principalmente em locais nos quais a mão de obra era de baixa qualidade.

Com base nesse contexto, foi inaugurado em 4 de dezembro de 1994 o atual Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) – *Campus* Cajazeiras, intitulado na época de Escola Técnica Federal da Paraíba. O instituto tem o objetivo de capacitar profissionalmente a mão de obra da região.

A arquitetura da instituição tem um estilo rústico, dispondo de larga utilização de concreto aparente, estilo construtivo que deixa o concreto armado bastante vulnerável devido ao fato do elemento estrutural estar totalmente exposto ao ambiente, sem contar com a proteção adicional promovida pelo revestimento. Além disso, a estética nesse tipo de estrutura depende exclusivamente do concreto, sendo necessário um cuidado maior na concretagem, desforma e manutenção, de forma a propiciar um melhor acabamento comparado ao do concreto com revestimento.

O início da construção do instituto se deu em 1 de dezembro de 1989, época em que ainda estava em vigor a Norma Brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 6118/80. Essa norma recomendava valores mínimos de cobrimento, sem levar em consideração o grau de agressividade do ambiente, como é feito atualmente. A norma determinava o cobrimento diferenciando se o concreto era aparente, se recebia algum revestimento ou se estava em contato com o solo.

Entretanto, mesmo com essas recomendações diferenciadas para concreto aparente, o sistema estrutural do IFPB – *Campus* Cajazeiras já apresentou diversos problemas relacionados a corrosão de armaduras, sendo necessário em alguns casos que houvesse uma manutenção corretiva, devido ao alto índice de degradação que alguns pontos apresentavam.

Diante da evolução da pesquisa no contexto da previsão do avanço da frente de carbonatação do concreto e despassivação do aço, cabe uma comparação entre os resultados apresentados nesses estudos com os obtidos em estruturas reais, para saber a aplicabilidade de tais métodos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo maior comparar a frente de carbonatação de uma estrutura existente com a fornecida por um modelo de previsão de carbonatação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Conhecer o avanço da carbonatação no concreto;
- b) Verificar os efeitos desencadeados pela carbonatação em estruturas de concreto armado;
- c) Verificar como se comporta a frente de carbonatação de estruturas reparadas.

1.4 JUSTIFICATIVA

A reação de carbonatação não tem interferências negativas sobre o concreto em si. Ao contrário disso, promove um aumento na sua resistência, como também tem seu papel sustentável, consumindo o dióxido de carbono presente na atmosfera. Entretanto, ao se tratar de concreto armado, surgem as preocupações que dizem respeito ao ataque sofrido pelo aço por consequência da corrosão. Isso se deve pelo fato da carbonatação diminuir a alcalinidade da peça de concreto, destruindo assim a proteção química inerente à armadura que evita que a corrosão aconteça.

Portanto, ao falar dos efeitos maléficos da carbonatação, estamos mencionando todas as consequências geradas pela ação da corrosão na armadura. Essas consequências se baseiam na degradação do aço, reduzindo sua seção transversal e conseqüentemente sua resistência. Além disso, os produtos da corrosão, por terem caráter expansivo, provocam tensões no concreto que acarretam o aparecimento de fissuras e destacamento do cobrimento do concreto. Todos esses fatores interferem na durabilidade da estrutura, assim como afirma Santos (2015, p.18):

[...] a vida útil de uma estrutura pode ser drasticamente reduzida se submetida a um processo corrosivo, sendo que para prolongá-la, é imprescindível aumentar os cuidados em todas as fases, desde o projeto a execução até a utilização.

Pelo fato dessa consequência indesejável, a carbonatação em estruturas de concreto armado deve ser evitada a todo custo, tendo em vista os desastrosos resultados que a deterioração da armadura por efeito da corrosão pode causar. Desse modo, a previsão desse efeito é de elevada importância.

Essa previsão pode ser feita por meio de modelações matemáticas, que levam em consideração os diversos fatores que influenciam na velocidade de carbonatação. Um desses

modelos foi transformado em um software intitulado Carambola e foi desenvolvido por Carmona (2005).

O principal intuito deste trabalho é fazer a comparação entre os resultados desse software e uma situação real, de forma a analisar se há discrepâncias entre os resultados, tendo em vista a grande variedade de métodos desenvolvidos com esse objetivo.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No próximo capítulo será feita uma revisão bibliográfica a respeito do assunto de carbonatação e da sua consequência mais grave: a corrosão de armaduras. No capítulo 3 será exposta toda a metodologia utilizada para a execução do trabalho, com a descrição de cada uma das etapas. Posterior a isso, no capítulo 4, serão apresentados os resultados alcançados, bem como as discussões necessárias. Por fim, no capítulo 5, conclui-se o trabalho expondo as considerações finais, descrevendo as deduções feitas a partir dos resultados obtidos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CORROSÃO

Na natureza, os metais são encontrados na forma de compostos com outros elementos, a exemplo de sulfetos e óxidos. A extração do metal desses compostos para utilização pelo ser humano é feita através de um processo denominado redução, em que ocorre uma aplicação de energia para que o elemento fique em seu estado puro, como afirma Andrade (1992):



O processo inverso, designado oxidação, e comumente chamado corrosão, ocorre espontaneamente diminuindo a quantidade de energia e retornando o metal ao seu estado natural de composto, deteriorando-o.

Nascimento (2015) trata a corrosão como um dos processos de oxirredução, que se trata da troca simultânea de elétrons através da formação de ânodos e cátodos, e define como sendo o produto da interação de um material com o meio ambiente, estimulando reações de natureza química e eletroquímica, resultando na destruição do material.

Helene (1993) define a corrosão como sendo a interação destrutiva entre um material e o meio ambiente, sendo consequência de alguma ação física (erosão e cavitação), química (reação de expansão e de lixiviação dos compostos hidratados da pasta de cimento Portland em argamassas e concretos), eletroquímica (processos corrosivos de metais em meios aquosos), ou a associação destas.

De acordo com Andrade (1992), a corrosão ocorre de várias formas, uma delas é em meio aquoso, através da formação de uma pilha eletroquímica. Nesse caso, ocorre tanto a redução como a oxidação e os íons são transportados pelo eletrólito. O metal é caracterizado pela formação de duas zonas, uma atuando como ânodo, onde ocorre a oxidação, produzindo íons a partir da superfície metálica e liberando elétrons. Os elétrons são conduzidos pelo eletrodo até a outra zona, catódica, onde ocorre a redução de alguma substância existente no eletrólito, que pode ser íons hidrogênio em meio ácido e oxigênio dissolvido na água em meios alcalinos.



Andrade (1992), conta que para a constituição da pilha de corrosão, é necessário antes de tudo a existência de um circuito fechado e a presença de umidade e oxigênio, dessa forma, são formados o ânodo e o cátodo que devem manter uma conexão elétrica e eletrolítica. As reações de redução e oxidação acontecem simultaneamente, resultando nos produtos da corrosão, como exemplo o Hidróxido de Ferro II ($Fe(OH)_2$) e o Hidróxido de Ferro III ($Fe(OH)_3$).

Figueiredo e Meira (2013), explanam que na formação da pilha de corrosão, os elementos necessários são: o ânodo, que se caracteriza pela passagem do material metálico para o estado iônico; o cátodo, que usufrui dos elétrons gerados no ânodo; uma diferença de potencial entre essas duas regiões, sendo a anódica a mais eletronegativa; uma ligação metálica, que pode ser do mesmo material metálico; e uma ligação externa responsável pela condução iônica através do eletrólito.

Helene (1993) aponta para a influência de três componentes básicos para a corrosão, o eletrólito, a diferença de potencial e o oxigênio:

- a) Eletrólito - Trata-se do meio onde ocorre a formação da pilha de corrosão eletroquímica, tem a função de gerar uma corrente de natureza iônica e dissolver o oxigênio. No concreto, é formado principalmente pela solução intersticial aquosa que contém íons;
- b) Diferença de potencial – É causada pela heterogeneidade do concreto, referente a fatores como umidade, aeração, concentração salina, tensão no aço ou concreto e fuga de correntes ou pares galvânicos;
- c) Oxigênio – É dissolvido na água presente no interior do concreto e é responsável por regular as reações de corrosão.

Carmona (2005) afirma que para que a corrosão transcorra, se fazem necessárias todas essas condições, tanto que a ausência de qualquer uma impede o acontecimento da reação. Um exemplo disso é a utilização de revestimentos que impossibilitem o acesso de gases e umidade para o interior do concreto.

Segundo Andrade (1992), a corrosão que ocorre na armadura do concreto armado é de natureza eletroquímica em meio aquoso e para que ocorra se faz necessária a existência, além dos fatores supracitados, de oxigênio e agentes agressivos para despassivação.

Cunha e Helene (2001) lembram que a presença desses agentes agressivos é preponderante para iniciar e intensificar a velocidade da corrosão, a exemplo de íons sulfetos, cloretos e o dióxido de carbono, já que são elementos fundamentais ao desenvolvimento do processo, destruindo a camada de passivação e atenuando a diferença de potencial.

Se tratando de ambientes agressivos, Thomaz (1989) destaca os ambientes marinhos, solos com elevado teor de matéria orgânica em decomposição ou contaminados, atmosferas de grandes cidades, ambiente industrial, além de paredes de galeria de esgoto que estão sujeitas à ação de gases tóxicos.

O fenômeno da corrosão também acontece com a formação de uma película de eletrólito que envolve os fios e as barras de aço, ocasionada pela existência de água no concreto, com exceção de situações específicas como dentro de estufas, ambientes de temperatura maior que 80°C ou de umidade relativa inferior a 50%. Esse tipo de corrosão é o que aflige as armaduras ainda em seu armazenamento, sendo menos complicada para o engenheiro civil preveni-la do que recuperá-la, como afirma Rocha (2015).

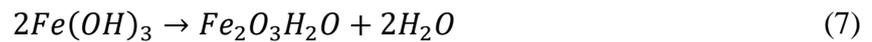
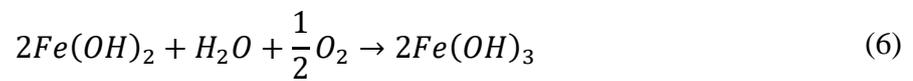
Poggiali (2009) explica que o processo de formação das células de corrosão pode ser originado de duas maneiras:

- a) Células de composição – São formadas quando existem dois metais distintos no interior do concreto, ou na existência de variações consideráveis na superfície da armadura;
- b) Células de concentração – São formadas em volta da armadura em virtude da diferença de concentração de íons dissolvidos.

Conforme Nascimento (2015) descreve, o ferro oxida com a presença do ar úmido, composto por oxigênio e água. O resultado dessa oxidação é o cátion Fe^{2+} , que perde dois elétrons, formando-se assim um dos polos da pilha, o ânodo. Com isso, ocorrem também as reduções formando o segundo polo da pilha, o cátodo. A mais comum é a da água, dada pela seguinte fórmula:

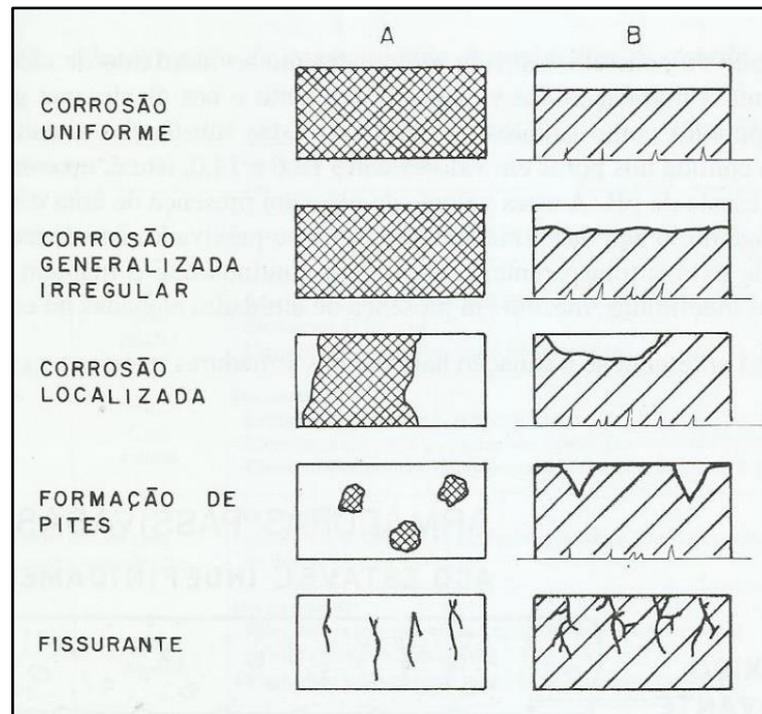


Ainda de acordo com Nascimento (2015) a formação da pilha continua com a movimentação dos íons. O cátion Fe^{2+} se desloca para o polo negativo da pilha, enquanto que o íon OH^- se direciona para o polo positivo. Com essa movimentação acontece uma reação que dá origem ao Hidróxido Ferroso. A presença do oxigênio desencadeia uma segunda reação que resulta no Hidróxido de Ferro III, que após perder água se transforma no Óxido de Ferro III Monohidratado, popularmente conhecido como ferrugem e tem a coloração castanho-avermelhada. As reações químicas desse processo estão descritas a seguir:



A corrosão é normalmente classificada de acordo com a extensão da área corroída, dividindo em 4 tipos: generalizada, localizada, por pite e fissurante (Figura 1):

Figura 1 - Morfologia da corrosão



Fonte: ANDRADE, 1992

Figueiredo e Meira (2013) explicam as diferenças nessa classificação:

- Generalizada – A reação ocorre em uma ampla área da superfície do metal e é constituída de diversos ânodos e cátodos, que formam micropilhas mudando constantemente. A perda de seção pode ser uniforme ou irregular. De acordo com Rocha (2015), esse tipo de deterioração não causa patologias tão alarmantes quanto por pites ou localizadas;
- Por pites – Se caracteriza pela degradação discreta do material em pontos específicos, menos ativos do que o restante da superfície. É comum em ataques de cloretos, que destroem a camada passiva protetora em locais restritos;
- Localizada – Pode-se definir como sendo o meio-termo entre as corrosões generalizada e por pites. O desgaste se concentra em regiões anódicas em relação às demais e se configura como uma área mais ou menos extensa. Um dos motivos dessa propensão a ocorrer no ânodo é o fato do concreto ser um material heterogêneo, no que se refere a sua composição química;
- Fissurante – Ocorre em situações em que, além das condições adequadas para que ocorra a reação, o aço se encontra submetido a tensões de tração. Nessa situação surgem fissuras que se caracterizam na direção transversal a carga, que provocam

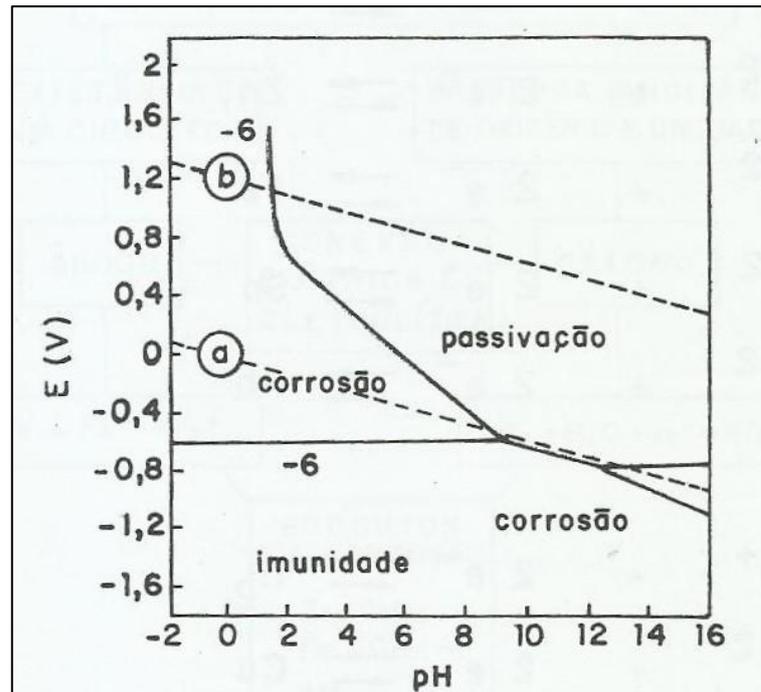
rupturas com níveis baixos de tensão. Esse fato é importante se considerado em estruturas de concreto protendido.

2.1.1 Despassivação da Armadura

Andrade (1992) esclarece que nem todos os metais são passíveis de corrosão, isso está relacionado a estabilidade do elemento, existindo alguns tão estáveis que se mantêm inalterados, independente da forma elementar. A série eletrolítica dos metais, os organiza do mais suscetível a corrosão, o Cálcio com potencial de $-2,76$ V, ao mais estável, Ouro, de potencial $+1,50$ V. O potencial de corrosão do Ferro é de $-0,44$ V.

Andrade (1992) ainda fala que como a corrosão ocorre em meio aquoso, os íons liberados no processo podem reagir com os que estão presentes na água, desse modo, a reação de corrosão depende também desses íons disponíveis na solução aquosa e, conseqüentemente, do pH do meio. É possível então determinar uma relação entre o potencial do processo de corrosão e o pH, gerando assim um gráfico, conhecido como digrama de Pourbaix (Figura 2). O diagrama identifica três estados em que o metal pode estar, que corresponde a maior ou menor probabilidade de corrosão de acordo com o pH: imunidade, passividade e corrosão.

Figura 2 - Diagrama simplificado de Pourbaix para o Fe a 25°C



Fonte: ANDRADE, 1992

No estado de imunidade, supõe que o metal não se deteriora, a menos que sejam fornecidas as condições termodinâmicas necessárias para isso. A passivação diz respeito ao estado em que o metal é encoberto com uma capa de óxidos imperceptível que impede que a corrosão aconteça. Por fim, como o próprio nome sugere, o estado de corrosão é aquele que o metal está suscetível para que tal processo ocorra.

Desses três estados, o mais interessante para o estudo da proteção contra a corrosão é o de passivação, que ocorre em teores de pH maiores que 11, formando uma película de óxidos que protegem o aço. Essa capa de óxidos é formada principalmente de ferrato de cálcio, oriundo da reação da ferrugem superficial, o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). De acordo com Rocha (2015), essa película é extremamente fina, com espessura da ordem de 10^{-3} a 10^{-1} μm .

Freire (2005, p. 42) também define a situação de passivação:

A passivação refere-se à perda de reatividade química de certos metais e ligas sob condições ambientais particulares. Nesta situação os metais e ligas tornam-se essencialmente inertes e atuam como metais nobres como o ouro e a platina.

Figueiredo e Meira (2013), afirmam que essa película passivadora tem diversas teorias que explicam sua formação, no entanto, a mais aceita é a que se trata de uma película de camada

dupla, com uma mais externa constituída de óxidos férricos e outra interna formada por magnetita. A proteção se dá por meio de sua alta resistência ôhmica, que interdita o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço, além de dificultar a dissolução do ferro. Esses fatores têm como consequência taxas de corrosão desprezíveis.

Andrade (1992) explica esse pH básico afirmando que a hidratação dos silicatos do cimento produz o hidróxido de cálcio que juntamente com os álcalis que são adicionados como sulfatos ao clínquer, mantêm o pH do concreto extremamente básico, em torno de 12 e 14.

Analisando o gráfico de Pourbaix do Ferro a 25°C, Cunha e Helene (2001) atentam que para a faixa de pH supracitada e valores usuais de potencial de corrosão no concreto, que estão entre +100 mV e -400 mV em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, a armadura encontra-se em estado de passivação, portanto, segura da ocorrência de oxidação.

De acordo com o exposto em E-Civil (2018):

[...] a proteção do aço no concreto pode ser assegurada por: elevação do seu potencial de corrosão em qualquer meio de $\text{pH} > 12$, de modo a estar na região de passivação (inibidores anódicos); abaixamento de seu potencial de corrosão, com o fim de passar ao domínio da imunidade (proteção catódica); e mantendo-se o meio com pH acima de 10,5 e abaixo de 13, que é o meio natural proporcionado pelo concreto, desde que este seja homogêneo e compacto.

Conforme Figueiredo e Meira (2013), o concreto em si promove à armadura dois tipos de proteção: a mecânica, através do cobrimento, impedindo que agentes externos agressores possam entrar em contato com o aço e uma proteção química, que é consequência da alta alcalinidade do concreto, devido a presença de hidróxidos de sódio e potássio, que forma uma camada de óxidos em volta da armadura.

Entretanto, Andrade (1992) explicita que todos os dois tipos de proteção podem apresentar falhas. O concreto, mesmo sendo um sólido compacto e denso é poroso, sendo constituído de uma rede de canais e capilares que podem estar interligados ou não, mas que facilitam a penetração de gases e líquidos que podem agredir a estrutura. E se tratando da proteção química, essa pode ser desfeita de duas maneiras: pela ação de cloretos em excesso, que podem estar presentes no concreto devido a adição no amassamento ou pela penetração desses agentes oriundos do meio externo; ou com a diminuição da alcalinidade por meio de reações com substâncias ácidas também em consequência do ambiente, principalmente pela reação de carbonatação decorrente da interação sobretudo do CO_2 com o concreto.

Andrade (1992) explica ainda que a despassivação ocasionada pela ação de íons despassivantes, a exemplo dos cloretos, está relacionada a corrosão localizada, já a diminuição do pH promove uma corrosão generalizada, já que atinge toda uma área do concreto. Com a combinação desses efeitos, pode ocorrer uma forte corrosão, agravada pelo fato de que os efeitos do CO₂ na fase sólida do cimento podem desagregar os cloroaluminatos, deixando assim cloretos livres, antes combinados.

2.1.2 Vida Útil de Estruturas em Relação a Corrosão

A norma NBR 6118 (2014) define vida útil como sendo o período de tempo em que a estrutura de concreto mantém suas características, sem a necessidade de manutenções corretivas significativas e que sejam atendidos os requisitos de uso e manutenção estabelecidos pelo projetista e construtor, além das execuções de reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

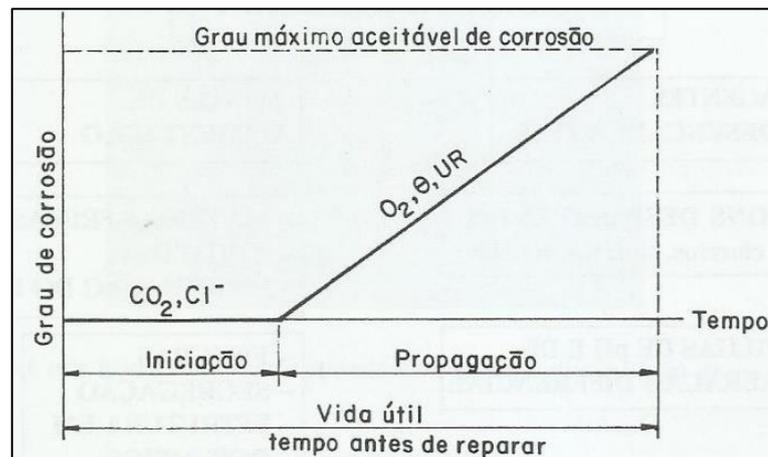
Como afirma Possan (2010), propor modelos matemáticos que descrevam o comportamento de estruturas no que se refere ao seu desempenho frente aos diversos tipos de degradação é um objetivo que tem sido almejado por boa parte da comunidade científica, principalmente envolvendo embasamento probabilístico, por estipular não só a vida útil de projeto, mas também margens de tempo positiva de negativa. Entretanto, existem quatro tipos de modelos que podem ser desenvolvidos:

- a) Baseados em experiências anteriores – Leva em consideração o conhecimento empírico adquirido em experiências em laboratório e em campo. Foi muito importante para as primeiras normatizações no campo do concreto, entretanto, com o grau de agressividade do ambiente se intensificando, a aplicação e resultados desse tipo de modelo não se mostram mais tão satisfatórios;
- b) Baseados em ensaios acelerados – A fonte de dados para esse tipo de modelo são ensaios acelerados que tentam reproduzir a degradação causada naturalmente em um curto espaço de tempo. Para isso, é utilizada uma relação entre a durabilidade e a evolução da deterioração natural, dando origem ao coeficiente de aceleração. Entretanto, devido ao elevado número de fatores que influenciam no processo de desgaste natural, principalmente se tratando do processo de carbonatação, e a falta de normatização para esses ensaios acelerados, torna-se complicada a obtenção dos coeficientes necessários;

- c) Por meio de métodos determinísticos – É com base em experiências anteriores e pode apresentar um certo nível de incertezas, pelo fato de considerar alguns aspectos constantes no tempo;
- d) Por meio de métodos estocásticos ou probabilísticos – É o método mais confiável, por considerar a aleatoriedade dos fatores influentes no processo de degradação da estrutura atuarem. Tem como abordagem probabilística mais utilizada a análise de confiabilidade.

Quando se trata de corrosão de armaduras, Tuutti (1982) propôs um modelo simples, mas que é muito aceito cientificamente para descrever esse fenômeno, através de um gráfico Tempo X Grau de deterioração (Figura 3).

Figura 3 - Modelo de vida útil de Tuutti (1982)



Fonte: ANDRADE, 1992

Andrade (1992) esclarece que nesse modelo, a vida útil da estrutura é dividida em dois períodos. O primeiro corresponde a iniciação, que é o tempo até que ocorra a despassivação da armadura. Nos casos que a causa dessa reação é a presença de íons despassivantes, é o tempo até que os compostos atravessem o cobrimento e reajam na superfície da armadura. Já nos casos em que a eliminação da camada passivadora tenha se dado por meio da diminuição do pH, é o tempo que compreende o avanço da frente de carbonatação até atingir a armadura.

Monteiro e Pereira (2011), apontam a relação água/cimento e o tempo de cura como os principais fatores que podem reprimir o acesso de agentes agressores a estrutura, por terem forte interferência na porosidade, isto é, na forma, no volume e no tamanho dos poros. Quanto maior o tempo de cura e menor a relação água/cimento, mais lenta se dá a penetração desses compostos.

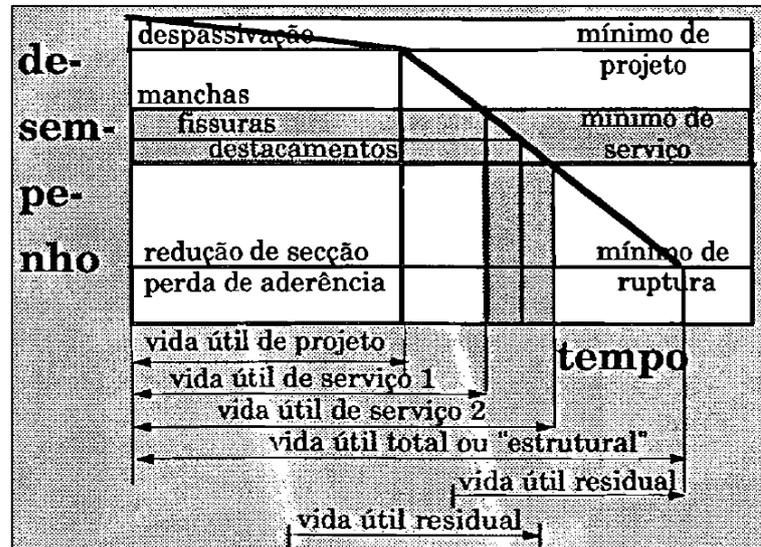
A duração do tempo de iniciação depende, além desses fatores e do meio ambiente, também da presença de fissuras no concreto, pois essas aumentam a permeabilidade da estrutura, facilitando o acesso de agentes agressivos ao seu interior. Segundo estudos, aberturas de até 0,4 mm de espessura não oferecem grandes riscos à estrutura quando comparadas a outros fatores importantes como a relação cobertura/diâmetro da armadura e qualidade do revestimento, pelo fato de que estas são muito pequenas e podem ser obstruídas com os próprios produtos da corrosão, assim afirma Andrade (1992).

A situação ideal, segundo Nascimento (2015), é que a passivação perdure por toda a vida útil da estrutura, garantindo sua integridade. Para isso, o revestimento adequado deve ser utilizado e projetado de acordo com as condições de agressividade do meio em que o concreto está submetido.

O segundo período é o de propagação e corresponde ao tempo de avanço da degradação até um limite em que a estrutura se torne inutilizável. Esse período, de acordo com Andrade (1992) tende a ser mais ou menos demorado, dependendo de vários fatores externos que estão intimamente ligados a reação de corrosão, a exemplo da presença de umidade e oxigênio.

Figueiredo e Meira (2013) apontam para o fato de que na fase de propagação, a partir do momento que parecem manchas de corrosão, fissuras ou destacamento do revestimento, é finalizada sua vida útil de serviço ou de utilização. Além disso, o tempo que decorre até o colapso da estrutura é referente a vida útil total. Nesse período há a redução considerável da seção resistente da armadura ou a perda de aderência entre o aço e o concreto. O diagrama da Figura 4 a seguir, proposto por Helene (1993) ilustra essa explicação.

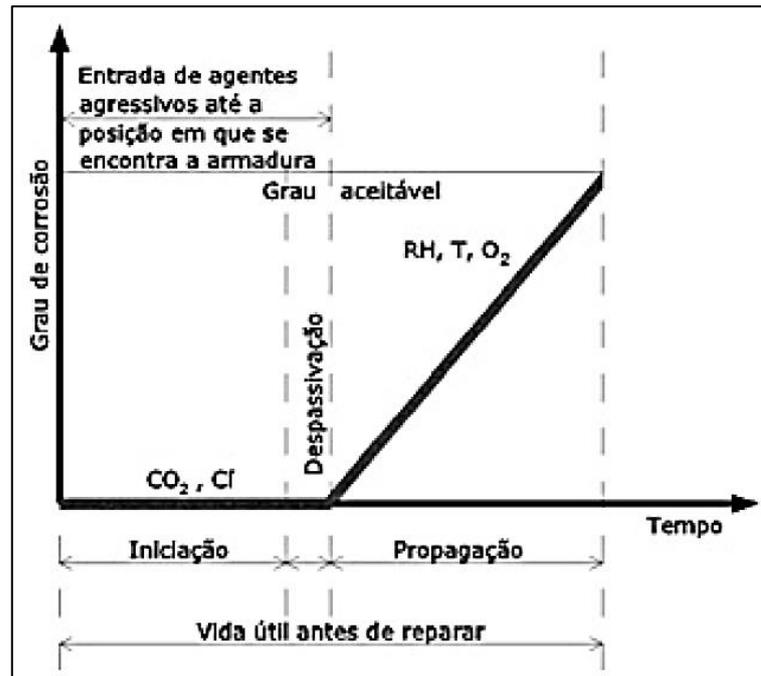
Figura 4 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras



Fonte: HELENE, 1993

Figueiredo e Meira (2013) propõem um modelo baseado no de Tuutti, que leva em consideração a ideia de que o processo de despassivação do aço compreende algumas alterações eletroquímicas na superfície do aço, e essas reações exigem um tempo considerável até que a corrosão comece a se desencadear de fato. Dessa forma, esse modelo alterado engloba três situações: iniciação, despassivação e propagação (Figura 5).

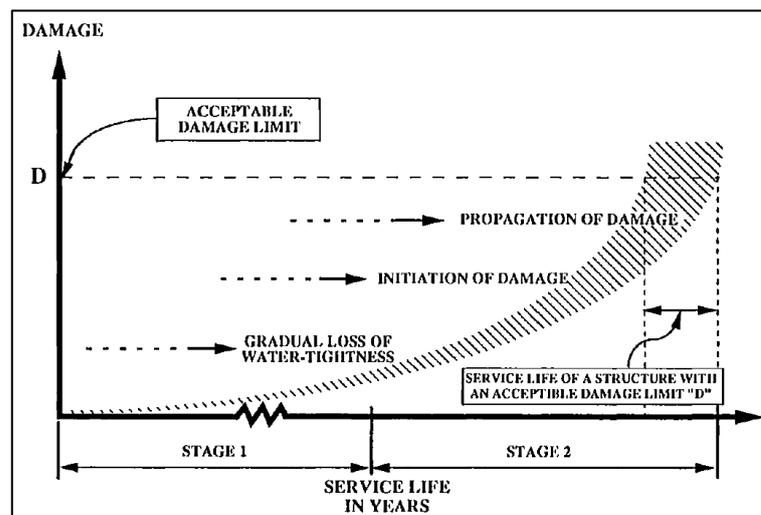
Figura 5 - Modelo proposto por Figueiredo e Meira (2013), adaptado do modelo de Tuutti (1982)



Fonte: FIGUEIREDO E MEIRA, 2013

Outro modelo bastante interessante e aceito pela comunidade científica é o proposto por Mehta (1994). O autor destaca o fato de que quanto mais afastado o tempo futuro, maiores são as incertezas e probabilidades de ocorrência de um evento de grandes magnitudes. Dessa forma, a vida útil seria melhor representada pela área demarcada no gráfico da Figura 6, do que de modo linear, em que existe uma tendência de comportamento.

Figura 6 - Modelo de vida útil formulado por Mehta (1994)



Fonte: MEHTA, 1994

2.1.3 Fatores que Aceleram a Corrosão

Diversos são os coeficientes que influenciam na celeridade da corrosão, como Rocha (2015, p. 4) aponta:

O fenômeno da corrosão de armaduras ocorre segundo vários fatores que agem simultaneamente, devendo sempre ser analisado com uma visão sistêmica. Para fins didáticos, os principais fatores podem ser analisados isolados e individualmente, mesmo sabendo que estão associados. Somente através do estudo e entendimento desses fatores e mecanismos de ação, assim como a noção dos parâmetros eletroquímicos da corrosão, será possível evitá-la em obras novas e retificar as patologias em estruturas existentes.

A velocidade da deterioração das armaduras seguirá de acordo com aspectos ligados as características da matriz do cimento, a presença de agentes agressivos no meio e as condições de interação ambiente-estrutura, como afirmam Figueiredo e Meira (2013). Dentre eles é importante destacar o teor de umidade, a temperatura, a existência de macrocélulas de corrosão, teor de agentes agressivos na atmosfera e as características do concreto.

2.1.3.1 Umidade

Andrade (1992) explica a interferência da umidade no processo de corrosão atentando para o fato de que o concreto tem muita facilidade de absorver umidade por se tratar de um sólido poroso, por outro lado perde água em uma velocidade bem inferior à que ganha. Por esse motivo, quando a umidade relativa exterior é constante há um equilíbrio entre a umidade exterior e a interior. Caso contrário, quando a umidade relativa exterior é variável, o teor dentro do concreto se torna constante enquanto que apenas a superfície da peça que está em contato com o ambiente acompanha essas oscilações.

Ainda de acordo com Andrade (1992), a umidade pode-se dizer que é o fator mais influente na velocidade de corrosão, porém existe um valor de “umidade ótima” em que a velocidade é máxima, que não engloba situações de escassez ou saturação. Quando a umidade é muito elevada a ponto de preencher os poros, a resistividade do concreto é a menor possível, o que facilita a formação da pilha de corrosão, no entanto, para o oxigênio atingir o aço é necessário antes que ele se dissolva na água, nessa situação diz-se que o processo está sendo controlado pelo oxigênio e ocorre em uma velocidade extremamente baixa. De outro modo,

quando o teor de umidade se encontra muito baixo, a resistividade do concreto é bastante elevada, dificultando o processo de corrosão e diminuindo consideravelmente sua velocidade, mesmo que o concreto esteja carbonatado ou contaminado de cloretos chegando a uma intensidade de corrosão de 0,1 a 0,2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, que é insignificante quando se fala em vida útil da estrutura. Conclui-se então que os valores de umidade que contribuem para a máxima velocidade de corrosão, são aqueles em que o concreto esteja úmido, resultando em uma baixa resistividade, porém sem ocorrer a saturação dos poros, deixando o livre acesso ao oxigênio. Nesses casos, a intensidade de corrosão está entre 10 e 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

De acordo com Neville (1997), essa umidade ótima em que a velocidade de corrosão é máxima está entre 70% e 80%.

De acordo como que foi exposto, é notório que o eletrólito tem bastante influência no processo de corrosão, uma vez que uma presença mais significativa de eletrólito favorece a passagem de uma maior corrente elétrica, acelerando assim a reação como afirma Figueiredo e Meira (2013).

Nascimento (2015) caracteriza o ambiente seco como um local fechado localizado na zona rural e a situação de saturação tem as estruturas submersas como exemplo. Esses locais têm baixo grau de agressão às estruturas, no que se refere à corrosão de armaduras. Já ambientes com frequentes ciclos de molhagem e secagem são os mais propícios para a propagação da corrosão, pela presença quase absoluta de umidade e o livre acesso de gases no concreto. Esses locais se localizam principalmente em ambientes de atmosfera marinha e industrial, por conter diversos compostos contaminantes, cloretos e sulfatos que aceleram ainda mais a velocidade da reação.

2.1.3.2 Temperatura

Andrade (1992) aponta para o fato da influência da temperatura no processo de corrosão ter efeitos negativos tanto para valores elevados como também baixos. O aumento da temperatura, segundo a autora, acelera a reação corrosiva pelo fato de aumentar a mobilidade dos íons. Entretanto, temperaturas mais baixas facilitam a condensação em locais de umidade considerada.

Nascimento (2015) conta que, quando submetida a condições de umidade intermediária, a corrosão pode ocorrer devido ao aumento da temperatura, influenciando na umidade do concreto. Em casos assim a agressividade é moderada, comum em ambientes urbanos. Em

grandes metrópoles, o efeito de degradação torna-se ainda maior, pelo fato do alto teor de agentes agressores na atmosfera, como óxidos de enxofre, fuligem ácida entre outros.

Vieira (2003) explica que a temperatura, além de intensificar a mobilidade das moléculas, também aumenta o teor de sais dissolvidos, em decorrência da elevação da condutividade do eletrólito.

2.1.3.3 Macrocélulas de Corrosão

Andrade (1992) define como sendo as pilhas propriamente ditas que são geradas entre duas áreas da armadura. Uma em processo de deterioração, servindo como ânodo e outra ainda passivada como cátodo. Isso acontece por exemplo em vigas de pontes, onde a parte superior sofre com a ação de cloretos oriundos dos sais de geada, dessa forma, a pilha se formará entre a armadura superior e inferior através dos estribos, sendo o ânodo e o cátodo, respectivamente. Essa situação acelera a velocidade em que ocorre a corrosão e esse aumento depende dos potenciais de corrosão e resistência do ânodo e do cátodo.

Os fatores responsáveis pela formação dessas macrocélulas de corrosão são: a heterogeneidade da fase metálica, caracterizada por diversos fatores como impurezas na matriz metálica, regiões submetidas à tensão e deformação elástica, entre outros; e a heterogeneidades do meio como diferenças de pH, teor de sais e aeração. Essas macrocélulas são divididas em cinco tipos, definidas por Figueiredo e Meira (2013):

- a) Diferença de concentração de sais – É a situação exposta anteriormente, em que há uma diferença no teor de sais de entre a armadura superior e inferior. É comum em ambientes de atmosfera marinha;
- b) Diferença de pH – Ocorre em concretos com características distintas, em que parte se encontra carbonatado, formando uma macropilha com a zona de pH elevado;
- c) Presença de fissuras – A fissura favorece a entrada de agentes agressivos no concreto atacando a camada passivadora naquele ponto, enquanto que regiões adjacentes continuam passivadas;
- d) Aeração diferencial – Embora a ocorrência isolada da aeração diferencial não iniciar o processo de corrosão, tem muita influência na sua propagação. É a situação em que ocorre diferenças no teor de oxigênio em diferentes partes da estrutura. A região anódica se desenvolve em locais de menor presença de oxigênio, enquanto que nas zonas de maior concentração se produz a região catódica. Essa diferença na

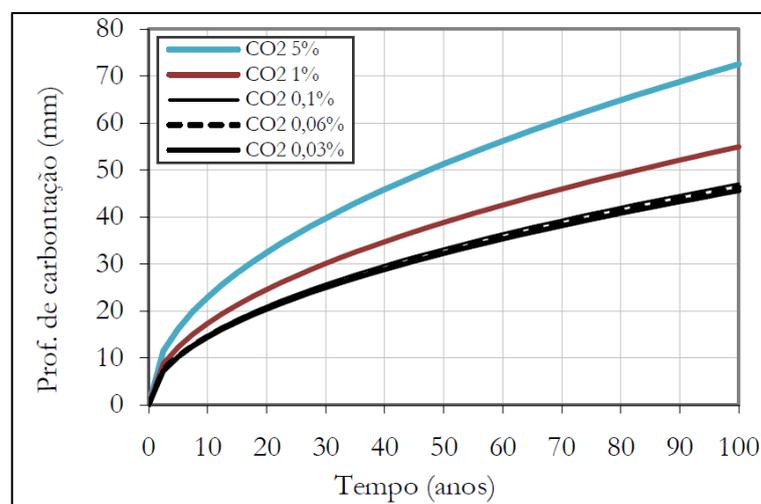
quantidade de oxigênio pode ser explicada por fatores como estruturas enterradas e solos de diferente permeabilidade, acúmulo de produtos de corrosão, ambiente situado em orla marítima e reparos executados com argamassas de permeabilidade diferente da do concreto original;

- e) Pilhas galvânicas – Ocorre quando a armadura está conectada a outros tipos de estrutura metálica, ou quando é submetida a um processo de galvanização. O metal mais ativo irá atuar como ânodo enquanto que o mais nobre formará o cátodo.

2.1.3.4 Teor de Agentes Agressivos no Ambiente

Como era de se esperar, quanto mais significativa for a concentração de agentes agressivos no meio em que a estrutura está situada menor será sua resistência a corrosão. Como Figueiredo e Meira (2013) exemplificam, no caso de um teor de CO₂ elevado, a frente de carbonatação atingirá mais rapidamente a estrutura, pensamento análogo a da penetração dos cloretos. Esse fato pode ser melhor observado nas Figura 7 a seguir, que mostra a interação do concreto de acordo com diferentes concentrações de CO₂. Nota-se, portanto, que peças de concreto de mesma característica, têm desempenhos diferentes de acordo com a agressividade do meio. Outro fator importante é a concentração de cloretos que tem dupla influência no processo de corrosão, pois diminui a resistividade em consequência da maior condutividade proporcionada por estes íons e aumenta a velocidade da reação.

Figura 7 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo em função do teor de CO₂



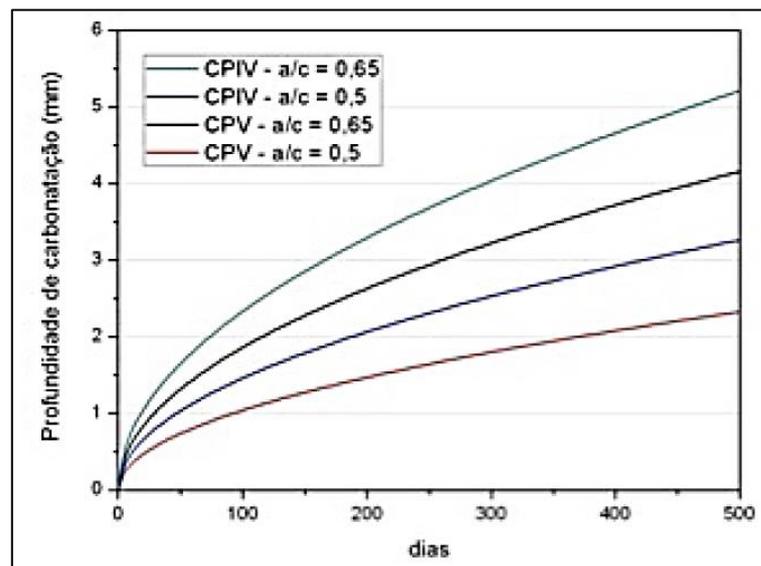
Fonte: POSSAN, 2010

Nos casos em que a quantidade de cloretos é significativa, o concreto tem a tendência a acumular água, que tem como consequência a diminuição da resistividade elétrica do concreto, aumentando assim a viabilidade da corrosão. Com a despassivação, a velocidade de corrosão será regulada pela resistividade elétrica e disponibilidade de oxigênio, como afirma Poggiali (2009).

2.1.3.5 Características do Concreto

Figueiredo e Meira (2013) apontam como as propriedades do concreto mais influentes no processo de iniciação da corrosão como sendo a porosidade, potencial alcalino e capacidade de fixação de cloretos. A porosidade, que está intimamente ligada a relação água/cimento, interfere na velocidade com que os agentes agressores adentram o concreto. A respeito do potencial alcalino, de acordo com a Figura 8, podemos analisar que concretos confeccionados com cimentos de alcalinidade mais baixa, como é o caso do Cimento Portland Pozolânico (CPIV) em relação ao Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV) requer um menor tempo até que a frente de carbonatação alcance a armadura. Já a capacidade de fixação dos cloretos é um aspecto que pode retardar o tempo que esses agentes agressores levam para atingir a armadura e está intimamente ligada a quantidade de aluminatos na matriz do concreto.

Figura 8 - Influência do tipo de cimento na carbonatação natural do concreto



Fonte: VIEIRA TE AL., 2010 apud FIGUEIREDO E MEIRA, 2013

Segundo Poggiali (2009), uma baixa permeabilidade do concreto é essencial para atenuar a ação de agentes agressivos como a água, o oxigênio e gases ácidos. Para se obter essa característica, é necessário monitorar o fator água/cimento, consumo de cimento, dimensão dos agregados e sua graduação e a utilização de minerais. Também é importante avaliar a execução da cura e o adensamento. A presença de outras patologias, como reação álcali-agregado e o ataque de sulfatos podem ocasionar um aumento na permeabilidade.

Freire (2005) aponta duas características importantes quando se trata da permeabilidade do concreto, que se dá de acordo com sua porosidade: os poros comunicantes, que podem transportar elementos nocivos ao elemento estrutural e a distribuição do tamanho desses vazios, que influencia na taxa dos mecanismos de transporte e ligação em relação à água.

Rocha (2015) classifica a rede de poros podendo ser principalmente poros de ar aprisionado (consequência do processo de adensamento), poros de ar incorporado (oriundos da utilização de aditivos incorporadores de ar), poros capilares (decorrente da saída da água livre do concreto) e poros de gel (devidos à água de gel), sendo os três primeiros de maior influência na durabilidade.

Rocha (2015) também chama atenção para o cobrimento, que, além da proteção mecânica, também tem a função de manter o pH alcalino do concreto e impedir o acesso de agentes agressivos em função de sua permeabilidade. A baixa permeabilidade também auxilia no aumento da resistividade elétrica, dificultando a movimentação das correntes elétricas entre as zonas anódicas e catódicas.

2.1.4 Efeitos da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado

O concreto armado vem sendo utilizado na construção civil desde o século XIX e por muito tempo foi considerado como um material infundável. Essa ideia só foi quebrada quando as estruturas começaram a apresentar falhas, que provocaram prejuízos sociais e econômicos em grande escala, devido aos elevados custos de manutenção. A corrosão é a terceira patologia mais frequente em estruturas de concreto armado, atrás apenas das fissurações e deformações excessivas, prejudicando principalmente a armadura. Esse defeito é facilmente notado nas construções datadas de 1960 a 1970, e tem exigido muito do mercado de reparo e proteção de estruturas. Por esse motivo, desde a década de 1980 a comunidade científica vem buscando recomendações para métodos de projeto e reparo, entretanto, como aponta Nascimento (2015), o problema é mais de conscientização do que de falta de normatização. Por se tratar de um

problema que demora de 10 a 15 anos para apresentar indícios, muitos profissionais acabam deixando de lado as medidas preventivas quanto ao problema de corrosão de armaduras.

Como Possan (2010) afirma: “Os efeitos da corrosão por carbonatação para as estruturas de concreto têm consequências graves, como alterações na estabilidade global, na segurança, na estética e no crescimento significativo dos custos de manutenção”.

A corrosão pode afetar negativamente o concreto armado de três diferentes formas: diminuindo a seção da armadura e conseqüentemente sua resistência, fissurando o concreto e diminuindo a aderência entre o aço e o concreto. Como explica Nascimento (2015), a corrosão pode se manifestar através de “manchas superficiais, fissuras, destacamento do cobrimento de concreto da ferragem e perda de massa das armaduras, resultando em redução na seção de seus componentes. ”.

Ripper e Souza (1998) explicam que, com a oxidação em progresso, surge na superfície do aço o óxido de ferro hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) que exerce pressão sobre o concreto de até 15 MPa, por ser um material expansivo, ocasionando assim a desagregação da camada de concreto que envolve a armadura.

Conforme Poggiali (2009), a ferrugem, produto da reação de corrosão do aço metálico, pode sofrer um aumento de volume de até 600% do volume original.

Os produtos da corrosão, segundo Andrade (1992), ocasionam aumento de tensões no interior do concreto que se não for tratado, pode gerar fissuras na direção paralela a armadura, comprometendo a comprovação dos estados-limite de ancoragem e superposição por transpasse. Essa fissuração pode ainda evoluir para o destacamento do cobrimento, deixando o aço exposto. No entanto, a presença dessas fissuras não é uma certeza absoluta. Há casos em que, quando há grande quantidade de água, os produtos da corrosão são transportados por ela entre os poros e emergem na superfície da peça como manchas avermelhadas.

No que se refere à perda de seção da armadura, Rocha (2015) afirma que esta se dá mais intensamente quando na ocorrência de corrosão por pite ou localizada, que se caracteriza por causar cavidades na barra de aço, provocando efeitos altamente nocivos às propriedades mecânicas e perda da resistência a fadiga.

Soluções simples poderiam ser adotadas na fase de planejamento e projeto para prevenir que tais efeitos ocorressem nas peças de concreto, exemplificados por Nascimento (2015) como o aumento da resistência de projeto, redução da relação água/cimento, detalhes arquitetônicos que reduzam o contato da estrutura com a umidade, impermeabilização correta de áreas em contato direto com a água e execução do cobrimento adequado. É importante salientar também

o fato da utilização dos novos produtos no mercado. É importante que seja feito um estudo prévio para analisar a interação desses materiais com o aço.

Polito (2006) alerta para o fato de que mesmo que a estrutura tenha sido projetada e executada de maneira a atender os requisitos exigidos por norma, alguns ambientes se mostram tão agressivos ao ponto de promover a corrosão. Nesses casos, torna-se interessante uso de métodos de proteção complementares para a armadura.

2.2 CARBONATAÇÃO

Como foi dito anteriormente, a corrosão pode se dar de forma localizada e generalizada. No entanto, neste trabalho foi optado por estudar a corrosão como fruto de uma despassivação provocada pela carbonatação do concreto, isto é, apenas a corrosão dada por generalizada. A localizada, motivada pela ação de íons despassivantes, não vai ser tema de estudo no presente trabalho, por isso, não é necessário um aprofundamento no tema.

A corrosão generalizada ocorre principalmente por dois motivos citados por Andrade (1992): a lixiviação, estimulada pela circulação da água no interior da estrutura, ou pela reação de compostos básicos presentes na fase aquosa do concreto com outros de caráter ácido existente no meio externo. Sendo a principal reação com o CO_2 da atmosfera, processo esse chamado de carbonatação.

Se tratando apenas do concreto, Ripper e Souza (1998) afirmam que a carbonatação é um fenômeno benéfico, pois eleva as resistências químicas e mecânicas. A reação se torna um problema quando atinge a armadura que dissolve a camada passivadora que protege o aço frente à corrosão. Esse efeito deixa o material suscetível a deterioração, uma vez que a probabilidade de a corrosão atacar a armadura imersa em um concreto não carbonatado, mas contaminado com cloretos da ordem de 0,4% da massa de cimento é quatro vezes menor do que se o concreto estivesse carbonatado e é a mesma de um concreto atingido pela carbonatação e com um teor de cloretos de 0,1%.

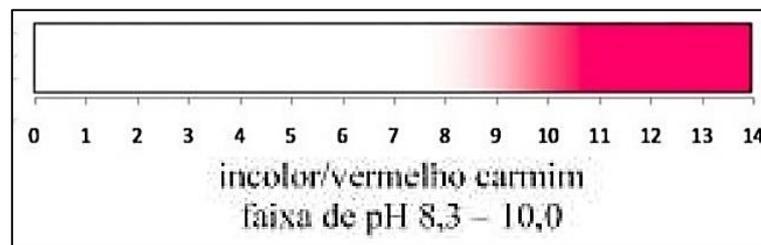
2.2.1 Ação da Carbonatação

A reação de carbonatação é a principal responsável pela diminuição do pH do concreto e, conseqüentemente, a corrosão generalizada. A ação dessa reação é caracterizada por uma

frente de atuação chamada de frente de carbonatação, que tem início na superfície mais externa da peça e avança a uma certa velocidade em direção ao interior. Essa “frente” distingue duas regiões bem definidas, uma com pH básico maior que 13, proveniente do concreto sem alteração e outra mais neutra, com pH menor que 8, onde a carbonatação já evoluiu. Possan (2010) explica que não só a alcalinidade do concreto é modificada pela ação da carbonatação, a precipitação dos carbonatos também altera a estrutura porosa do material.

Esse desenvolvimento da frente carbonatada é facilmente identificado por meio de uma aplicação de fenolftaleína que reage diferentemente para cada nível de pH, mudando de cor entre o pH de teor 8,3 e 10, sendo vermelho-carmim na área alcalina e transparente em contato com a região carbonatada (Figura 9). No entanto, Cunha e Helene (2001) destacam que esse ensaio tem como ponto negativo o fato de ser destrutivo e não gerar resultados quantitativos no que se refere a concentração de carbonatos.

Figura 9 - Ponto de viragem da fenolftaleína



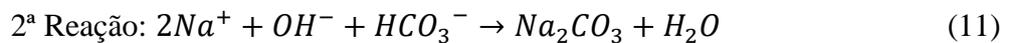
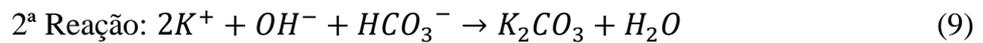
Fonte: CASTRO, 2009 apud BAZZAN, 2014

O fator preponderante para que a carbonatação se inicie é o acesso dos agentes agressivos ao interior do material, através da sua rede de poros. Os processos que regulam essa entrada se chamam mecanismos de transporte e dentre eles Possan (2010) destaca a permeabilidade, a absorção capilar, a difusão de íons e gases e a migração de íons, sendo a difusão o aspecto preponderante. Fatores relacionados ao ambiente (sol, umidade relativa, vento e temperatura) e a matriz do concreto e sua execução (relação água/cimento, tipo e teor do cimento, adições, cura, tensões, cargas, dentre outros) influenciam na velocidade com que esse processo ocorre.

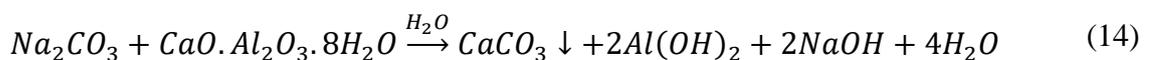
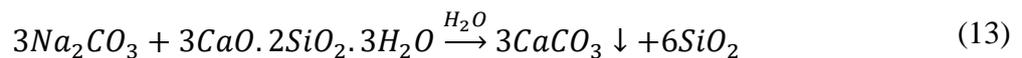
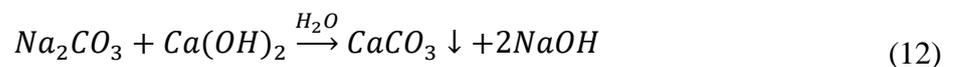
Os mecanismos de transporte do tipo absorção capilar e migração de íons não são influentes no ingresso do CO₂ no concreto. O fenômeno da permeabilidade só ocorrerá em raras situações em que haja diferenças de pressão que possibilitem esse transporte, como afirma Helene (1993).

Poggiali (2009) realça os principais componentes presentes na atmosfera que podem reagir com o concreto ocasionando a carbonatação: dióxido de enxofre (SO_2), gás sulfídrico (H_2S), mas principalmente o gás carbônico. Já no concreto, os principais compostos que participam das reações de carbonatação são o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH), além também dos silicatos alcalinos.

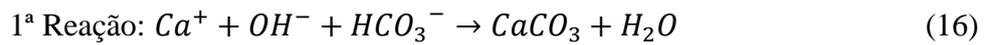
Cunha e Helene (2001), explicam as equações simplificadas para os compostos básicos carbonatáveis, que se resumem basicamente na carbonatação dos álcalis mais solúveis do cimento e em seguida do NaOH e KOH . As equações estão expostas a seguir:



Guimarães (2000) apud Figueiredo e Meira (2013) chamam atenção para o fato de que o hidróxido de sódio, após fazer parte da reação de carbonatação, é restabelecido depois de reagir com carbonato de cálcio, silicato tricálcico (C_3S) hidratado ou aluminato de cálcio hidratado, estando propício para reagir novamente com o gás carbônico dando continuidade ao processo, como mostram as equações a seguir:

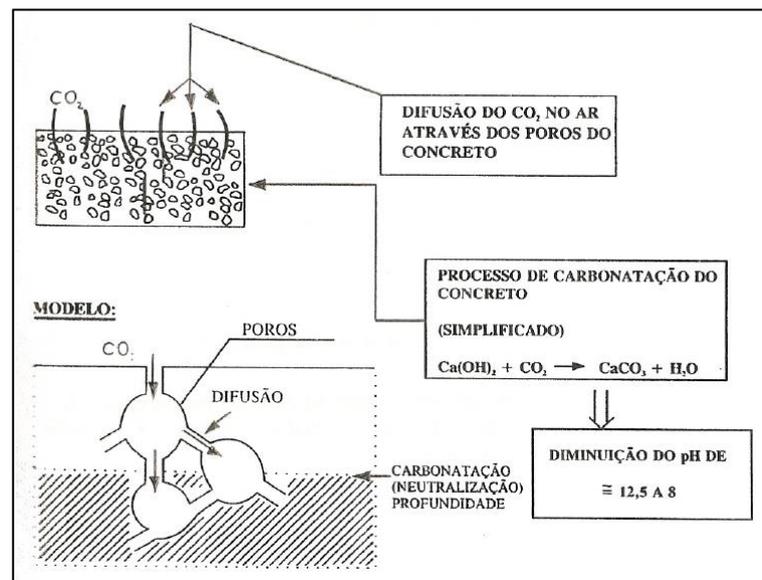


No que se refere ao hidróxido de cálcio, Cunha e Helene (2001) afirmam que a reação ocorre da seguinte forma:



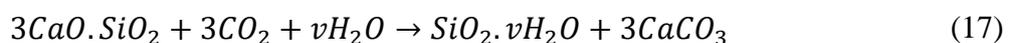
Vagheti (2005) explica a carbonatação com o composto de hidróxido de cálcio relatando que inicialmente o gás carbônico e o hidróxido se dissolvem em meio a solução dos poros de concreto liberando os íons Ca^+ e CO_3^{2-} . Após a dissolução atingir um limite de solubilidade ocorre a reação, transformando-se em Carbonato de Cálcio (CaCO_3). A Figura 10 ilustra esse processo.

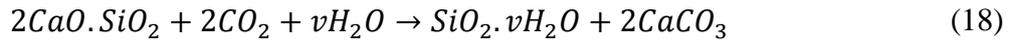
Figura 10 - Avanço do processo de carbonatação



Fonte: FIGUEIREDO, 2005 apud POGGIALI, 2009

Papadakis et al. (1991) apud Figueiredo e Meira (2013), explicam como ocorre a carbonatação por efeito da reação dos silicatos C_3S e Silicato Dicalcico (C_2S) presentes no concreto com o dióxido de carbono de acordo com as seguintes equações:





Outro processo de carbonatação importante é citado por Bakker (1988) apud Figueiredo e Meira (2013) e Taylor (1997) apud Figueiredo e Meira (2013) que acontece com o Silicato de Cálcio Hidratado (CSH), pois a reação tem como produto não só o carbonato de cálcio, mas também o gel de sílica, que possui uma estrutura porosa, facilitando assim a sequência do processo e a carbonatação de outras fases hidratadas que contenham Alumínio e Ferro.

O carbonato de cálcio, produto da maioria das reações de carbonatação, por ser insolúvel em água, obstrui os poros do concreto ao depositar-se, entretanto não é suficiente para impedir o avanço da reação pois, de acordo com Rocha (2015), com a lixiviação dos produtos da carbonatação o processo é continuado. Poggiali (2009) também lembra que a água resultante das reações pode não evaporar, dissolvendo assim o hidróxido de cálcio da pasta do cimento, dando continuidade ao processo.

Uma das patologias que podem ser originadas a partir da carbonatação é a eflorescência, decorrente da lixiviação do hidróxido de cálcio aliada a formação do carbonato de cálcio. Esses produtos se assentam na superfície do concreto formando manchas de cor esbranquiçada, podendo evoluir para a forma de estalactites. Quanto mais intenso esse processo, mais poroso vai se tornando o concreto, tendo maiores espessuras de carbonato de cálcio conforme Freire (2005).

Após a carbonatação atingir a armadura, o aço é despассивado, finalizando o período de iniciação e começa o de propagação, desencadeando uma oxidação generalizada. A armadura nesse caso fica em um estado semelhante a exposição à atmosfera, no entanto em uma situação mais desfavorável, pois o concreto tem facilidade de absorver umidade, mas não de perder, dessa forma o teor de água no interior do concreto é maior.

2.2.2 Variáveis Importantes no Processo de Carbonatação

A espessura carbonatada sofre variação de velocidade de acordo com diversos aspectos. Dentre eles é importante destacar a qualidade do cimento, sua resistência e fatores ambientais. Bazzan (2014) discorre que além da concentração da CO_2 na atmosfera em quem a estrutura está inserida, a umidade tem bastante influência na velocidade de carbonatação, assim como também a porosidade da peça de concreto. A autora também destaca que a velocidade da reação

aumenta quanto maior o teor de CO₂ na atmosfera, esse efeito é mais observado em concretos de alta relação água/cimento. Além disso, em ambientes fechados o teor de CO₂ é mais significativo quando comparado a locais abertos.

Já Molin et al. (2007) afirma que a velocidade e profundidade de carbonatação aumenta conforme a concentração de CO₂ no ar somente até um valor limite, que ainda não foi mensurado e sugere pesquisas na área para analisar a queda no avanço da reação, que provavelmente está relacionada a mudanças na estrutura para uma dada concentração de CO₂. Essa atenuação da velocidade com que a frente de carbonatação avança é explicada por Helene (1993) pelo aumento gradual da compacidade do concreto, que é consequência da hidratação gradativa do cimento, como também da obstrução dos poros pela precipitação dos produtos da carbonatação, principalmente o carbonato de cálcio, prejudicando assim o ingresso do dióxido de carbono.

Helene (1993) também descreve que a concentração de gás carbônico na atmosfera varia de acordo com o local. Em ambientes rurais, esse teor está compreendido entre 0,03% a 0,05%, enquanto que em locais de tráfego intenso esse valor varia entre 0,1% a 1,2%, chegando a 1,8% em atmosferas viciadas. Neville (1997) aponta para o fato de que, mesmo a concentrações muito baixas, como é o caso de atmosferas rurais, o dióxido de carbono pode reagir.

No que se refere a qualidade do concreto, Bazzan (2014) explica que o tipo de cimento utilizado para o traço do concreto interfere na quantidade de compostos alcalinos que poderão reagir com o CO₂. A quantidade de cimento também tem interferência, diminuindo a velocidade de carbonatação a medida que o volume de aglomerante por metro cúbico aumenta. O traço do concreto também é preponderante, uma vez que define a porosidade, difusividade, absorção e permeabilidade da pasta endurecida. Além disso, a qualidade na execução da cura tem forte influência na porosidade e consequentemente na permeabilidade.

Monteiro e Pereira (2011), fizeram um trabalho interessante a respeito da interferência da utilização de adições minerais no cimento em relação a carbonatação. Em seu trabalho foi constatado que cimentos com adições de sílica ativa e metacaulim mostraram resultados inferiores ao cimento comum, sem adições, referente a profundidade de carbonatação. Desse modo, foi comprovado que, mesmo com o efeito benéfico do refinamento dos poros, a adição de minerais provoca um aumento no teor de compostos alcalinos e consequentemente favorece a ocorrência da reação. Os autores concluíram ainda que um processo de cura bem executado é de fundamental importância para reduzir a ação da carbonatação. Segundo Neville (1997), esse

efeito indesejado provocado por adições está relacionado com a redução do pH na fase líquida dos poros devida a ocorrência das reações pozolânicas que consomem o hidróxido de cálcio.

Como Helene (1993) descreve, o fator de controle para a velocidade de carbonatação é a concentração de dióxido de carbono na rede de poros do material, esse aspecto está atrelado ao tipo de cimento, seu grau de hidratação e relação água/cimento, independente do consumo do aglomerante. Dessa forma, concretos com mesmas características de execução e exposição, mas com teores de consumo de cimento distintos podem apresentar a mesma profundidade de carbonatação. A explicação para isso está relacionada a reserva alcalina, quanto maior a concentração de Ca(OH)_2 , menor vai ser a velocidade da reação, pois para o CO_2 reagir com esse elemento, será preciso antes diminuir o pH do meio.

De acordo com a NBR 6118:2014, o controle de fatores como o cobrimento, porosidade e fissuração são de fundamental importância para bloquear o acesso de agentes nocivos ao interior do concreto. Por isso, são fixados valores limites de espessura de fissuras que podem ocorrer, sem afetar a proteção das armaduras proporcionada pelo próprio concreto e o conforto dos usuários. Esses valores estão entre o intervalo de 0,2 e 0,4 mm. A norma também recomenda valores de cobrimento de acordo com a classe de agressividade ambiental, que vai desde zonas rurais, afastadas do mar com risco de deterioração insignificante (Classe I), até áreas de atmosfera marinha ou industrial com risco de deterioração elevado (Classe IV) (Figura 11).

Figura 11 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal

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

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

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

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

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

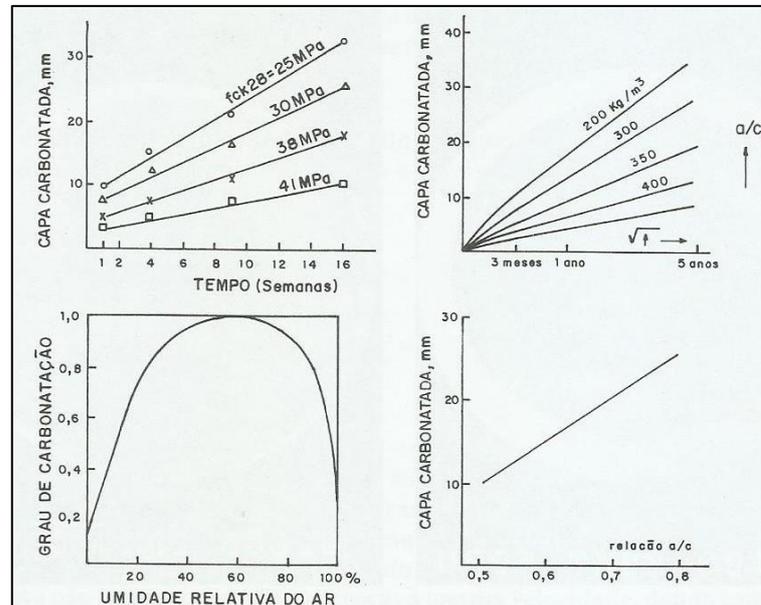
Fonte: ABNT NBR 6118, 2014

Embora a carbonatação atinja mais rapidamente a armadura em locais fissurados, os produtos da corrosão nesses locais obstruem essa fissura. Com isso, dá-se início um complexo fenômeno de realcalinização, na hipótese de que não haja movimentações estruturais significativas. Dessa forma, Tuutti (1982) cita que estruturas carbonatadas em processo de fissuração podem ser tratadas como não fissuradas.

Santos (2015) aponta para o fato que em regiões que o concreto se encontra tracionado, a carbonatação ocorre de maneira mais intensa pelo fato de que, submetido a esse tipo de esforço, o concreto apresenta uma fissuração mais excessiva.

Andrade (1992) mostra a relação que alguns fatores têm com a velocidade de carbonatação. São eles a relação água/cimento, proporção por metro cúbico de concreto, resistência característica e umidade relativa do ar (Figura 12). Além disso, chama atenção para os valores de umidade ótima de avanço da carbonatação, que se encontra entre 50 a 80% de umidade relativa.

Figura 12 - Exemplos de variação da espessura carbonatada com a resistência do concreto, o consumo de cimento, a relação água/cimento e a umidade do ambiente



Fonte: ANDRADE, 1992

A relação água/cimento tem grande influência na porosidade do concreto, dessa forma, contribuindo para a velocidade de avanço da frente de carbonatação. De acordo com Mehta & Monteiro (2008), um aumento de 0,4 para 0,8 da relação água/cimento induz em um aumento da porosidade da ordem de 5 vezes e a difusão de CO_2 , que é o primeiro passo na reação de carbonatação, tem um acréscimo de mais de 10 vezes. Essa ideia condiz com o gráfico apresentado por Andrade (1992).

Outro exemplo da importância da relação água/cimento para o fenômeno da carbonatação é abordado por Molin et al. (2007), que para razões acima de 0,6, em aproximadamente um ano de exposição ao CO_2 , já é possível obter resultados de profundidade carbonatada, enquanto que para concretos fabricados com essa relação abaixo de 0,5 o tempo em que é possível verificar a velocidade da frente de carbonatação pode chegar a 20 anos.

Neville (1997) destaca o fato de que, como a relação água/cimento influencia na resistência do concreto, por muitas vezes a literatura aponta que a carbonatação é função dessa resistência, pensamento equivocado, diante dos resultados obtidos em ensaios de laboratório.

De acordo com Freire (2005), a profundidade da frente de carbonatação no concreto está relacionada a razão água/cimento, em média em uma proporção 4:2:1 para os teores de 0,80, 0,60, e 0,45, independente do ambiente em que a estrutura esteja inserida. A autora ainda afirma que a carbonatação pode ser 10 vezes mais intensa em um ambiente climatizado (umidade

relativa de 65% e temperatura de 23°C), quando comparado a ambiente úmido, devido à diminuição da permeabilidade do CO₂ no concreto em função da presença de água.

Figueiredo e Meira (2013) esclarece o comportamento do gráfico que mostra a influência da umidade relativa do ar. Esse teor interfere na quantidade de água nos poros. Quando a rede de poros se encontra em estado seco, a carbonatação não acontece pelo fato de não existir o meio aquoso necessário, já em situação de saturação, a velocidade da reação depende da difusão do CO₂ na água, que se trata de um processo 10000 vezes mais lento do que no ar.

Bazzan (2014) atribui a ocorrência dos ciclos de molhagem e secagem a que as estruturas exteriores estão expostas, à complexidade da ação da umidade na velocidade de carbonatação, por esse motivo, peças estruturais que estão abrigadas do meio externo manifesta uma velocidade de reação mais rápida.

Se tratando de temperatura, Neville (1997) afirma que pequenas variações têm efeitos insignificantes para a carbonatação. Esse fato é afirmado também por Papadakis, Vayenas & Fardis (1991) apud Possan (2010), que declaram que temperaturas entre 20 e 40°C praticamente não influenciam no processo de carbonatação, pois nesse intervalo, a velocidade em que ocorre a reação é regulada pela difusão.

Possan (2010) fez uma compilação das variáveis influentes no fenômeno da carbonatação e organizou em um quadro expresso a seguir (Quadro 1).

Quadro 1 - Compilação das variáveis que influenciam a carbonatação do concreto

FATOR	INFLUÊNCIA	EFEITO E FATORES DETERMINANTES	IMPORTÂNCIA RELATIVA
CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	- A velocidade de carbonatação aumenta com a concentração de CO ₂ (para teores de 0 a 10%), principalmente para concretos de elevadas relações água/cimento.	- Poluição do ar (Efeito estufa) – a concentração de CO ₂ no ar varia, em geral, entre 0,03% e 1,2% (em centros urbanos).	- Baixa para teores até 0,1%, elevada para teores maiores.
UMIDADE RELATIVA DO AR	- Exerce influência sobre a quantidade de água contida nos poros do concreto e esta, por sua vez, condiciona a velocidade de difusão do CO ₂ através dos poros do material. Poros saturados exigem que o CO ₂ penetre por difusão, diminuindo a velocidade de penetração em até 10000 vezes, enquanto que a baixa umidade impede a reação de carbonatação. - Se os poros estão apenas parcialmente preenchidos com água, a frente de carbonatação avança mais rapidamente devido à existência	- Umidade relativa do ar; - Microclima; - Teor ótimo entre 50 e 70%.	- Elevada.

	simultânea da água e da possibilidade de difusão de CO ₂ .		
TEMPERATURA	- O aumento de temperatura não causa grande aumento na taxa de carbonatação. - É importante no período de propagação, pois influencia na taxa de corrosão.	- Clima.	- Baixa
EXPOSIÇÃO À CHUVA	- Função da quantidade de água para difusão do CO ₂ . - Depende da velocidade de molhagem e secagem da estrutura ou do elemento estrutural, que indiretamente vincula-se à precipitação e aos ventos.	- Projeto da estrutura, vento, chuvas dirigidas, dimensões do elemento estrutural. - Em ordem crescente carbonatação é maior em ambientes: internos; externos protegidos da chuva; e externos desprotegidos da chuva.	- Elevada.
PERMEABILIDADE	- A permeabilidade do concreto é diretamente proporcional à velocidade de carbonatação. Relaciona-se com a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido. Quanto maior for a relação água/cimento, maior será a porosidade e a permeabilidade de um concreto, aumentando assim a penetração de CO ₂ para o interior do material.	- Depende do diâmetro de conectividade dos poros que indiretamente é função do tipo de cimento e adições utilizadas, relação água/cimento, condições de execução e cura.	- Elevada.
CURA	- Quanto maior o tempo de cura, maior será o grau de hidratação do cimento, minimizando a porosidade e a permeabilidade	- Tempo (duração) e tipo de cura.	- Elevada.
RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO OU RESISTÊNCIA	- Estes parâmetros determinam a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido. Quanto maior for a relação água/cimento, menor será a resistência, maior será a porosidade e a permeabilidade do concreto, facilitando a penetração de CO ₂ para o interior do material.	- Quantidade de água da mistura; tipo de cimento, tempo e duração da cura. Diâmetro e conectividade dos poros.	- Elevada.
QUANTIDADE DE PRODUTOS CARBONATÁVEIS	- Disponibilidade de carbonatos para consumo da reação. O consumo de cimento no concreto influi na permeabilidade e na capacidade de fixação do CO ₂ através da reserva alcalina que o cimento confere ao concreto endurecido, devido à quantidade de hidróxidos de cálcio, sódio e potássio na solução dos poros, além do silicato de cálcio hidratado e do aluminato de cálcio hidratado.	- Quanto maior for a quantidade menor a velocidade de carbonatação, isso depende da presença de adições, do consumo de cimento, da composição química do cimento (tipo de cimento).	- Elevada.

Fonte: POSSAN, 2010

Mesmo com todas essas informações, Molin (2007) chama atenção para a necessidade de uma padronização nas normas brasileiras referentes a ensaios relacionados a carbonatação se faz necessária, principalmente se tratando de ensaios acelerados, para assim ter uma base mais sólida de conhecimento no que se refere à concentração de CO₂, tipo e tempo de cura, procedimentos de sazonalidade e tamanho de amostras.

2.2.3 Métodos de Previsão de Carbonatação

Devido aos altos custos de manutenção, engenheiros e arquitetos têm se preocupado cada vez mais com conceitos como durabilidade e vida útil. Dessa forma, modelos de previsão têm sido criados com base nesses aspectos. Entretanto, prever a vida útil de uma estrutura de concreto é um processo extremamente complexo, pelo fato de que as diferentes estruturas têm índices de degradação distintos, englobando assim diversas incertezas.

O maior empecilho na criação desses modelos é a falta de normatização para os ensaios acelerados, principalmente se tratando dos fatores ambientais e procedimentos de ensaio, gerando assim resultados e discussões acerca da confiabilidade desses métodos.

Possan (2010) classifica esses métodos em determinísticos, que estimam a degradação máxima ou média, e probabilísticos que leva em consideração a probabilidade de ocorrência dos fatores que são preponderantes para que o tipo de deterioração que se pretender analisar. O modelo determinístico geralmente não é satisfatório, principalmente quando se deseja analisar o risco de um projeto alcançar ou não o máximo de sua vida útil, por isso, o modelo probabilístico é mais aceito e na maioria dos casos a abordagem da análise de confiabilidade. No caso da corrosão de armaduras facilitada pela carbonatação, esses modelos têm foco na penetração do CO₂ no interior do concreto, que depende de diversos fatores relativos aos materiais de construção, processo construtivo e condições ambientais.

A velocidade com que a frente de carbonatação atinge a estrutura é extremamente baixa, geralmente levando anos para atingir a armadura, entretanto é um progresso que se atenua com o tempo, geralmente regido pela equação apresentada por Andrade (1992):

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad (19)$$

$$K = \frac{x}{\sqrt{t}} \rightarrow t = \left(\frac{x}{K}\right)^2 \quad (20)$$

Nesse caso, “x” é a profundidade da frente carbonatada, “t” é o tempo em anos e “K” é uma constante que depende de diversos fatores referentes a qualidade e resistência do concreto e de variáveis referentes a agressividade ambiental.

A constante K pode ser mensurada em uma primeira medição de profundidade de carbonatação, desde que se tenha noção do tempo de exposição ao CO₂ a que aquela peça foi submetida. Em uma segunda medição é possível determinar o tempo até que a frente atinja a estrutura, utilizando o valor de K já encontrado. Entretanto, Bazzan (2014) alerta para o fato dessa metodologia não poder ser utilizada para concretos de confecção recente.

Possan (2010) chama atenção para a infinidade de modelos existentes na literatura, alguns possuem dados de entrada simples, como relação água/cimento, resistência à compressão concreto, coeficiente de difusão entre outras propriedades. Entretanto, esses modelos geralmente não apresentam resultados satisfatórios, por não abranger todas as variáveis. Existem também modelos complexos que necessitam de dados de entrada de difícil obtenção, esses modelos, porém são mais confiáveis. Além disso, de forma geral, os modelos existentes não levam em consideração a correspondência dos resultados de ensaios acelerados e em situação real.

Possan (2010) em sua pesquisa destacou que no Brasil, existem alguns modelos de previsão de degradação baseados tanto na fase de iniciação como de propagação, no entanto, nenhum deles é amplamente difundido nem mencionado nas normas técnicas. O que se tem de normatização são apenas tabelas prescritivas que determina limites aceitáveis, sem especificação da vida útil desejada.

Carmona (2005) fez um trabalho interessante nesse contexto. O autor descreveu diversos métodos que são difundidos na sociedade científica, avaliando o desempenho de cada um deles. De acordo com o relatado, alguns se mostraram incompletos, não englobando todos os parâmetros necessários, ou se baseando em ideias errôneas, como por exemplo utilizar o consumo de cimento para estimar a quantidade de reserva alcalina. É chamada atenção também para modelos que apresentam resultados satisfatórios, no entanto têm variáveis de difícil obtenção, inviabilizando a sua utilização em larga escala. Ao fim da avaliação, o escritor faz uma comparação entre alguns modelos variando a classe de concreto em uma mesma condição ambiental.

Como conclusão da pesquisa feita por Carmona (2005), é apontado o modelo de previsão de carbonatação desenvolvido por Helene (1997) como sendo o mais completo e o que melhor se aproximou dos resultados obtidos no experimento feito pelo autor. Com isso, foi desenvolvido um software para auxiliar no cálculo da estimativa de carbonatação com base no trabalho citado, e que tem como dados de entrada o tipo de cimento, a resistência do concreto, o cobrimento da armadura e a concentração de CO₂ no ambiente. Os resultados oferecidos são a taxa de carbonatação (em mm/ano^{1/2}) e o tempo até a desp passivação (em anos). O programa ainda tem a opção de trabalhar com modelo determinístico ou probabilístico.

O software desenvolvido por Carmona (2005), intitulado “Carambola” foi utilizado nessa pesquisa.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada no presente trabalho foi baseada nos conceitos e técnicas utilizadas na Engenharia Diagnóstica, para auxiliar na identificação de irregularidades e principalmente no levantamento dos dados necessários. A conduta estabelecida para a realização do levantamento de subsídios do problema em estudo foi fundamentada no conceituado trabalho desenvolvido por Lichtenstein (1986), que divide esse processo em três etapas: vistoria do local, anamnese do caso e por fim, as análises e ensaios necessários.

Em seu trabalho, Lichtenstein (1986) descreve toda a metodologia utilizada para o tratamento das patologias das construções, desde o levantamento de dados até a escolha do método de intervenção. Entretanto, como o objetivo desta pesquisa é apenas a comparação da profundidade de carbonatação entre uma situação real e outra desenvolvida por um modelo de previsão, apenas a fase de levantamento de subsídios se faz relevante para a obtenção dos dados necessários.

3.1 VISTORIA DO LOCAL

O primeiro passo para o levantamento de subsídios foi feito através de uma visita ao local, visando encontrar sintomas perceptíveis da ocorrência de corrosão de armaduras no sistema estrutural do IFPB – *Campus* Cajazeiras. Esses locais provavelmente teriam a maior probabilidade de serem pontos críticos no que diz respeito a carbonatação do concreto.

Com isso, foi realizado um levantamento fotográfico em todos os elementos estruturais do referido instituto em busca das principais evidências de corrosão, a exemplo de manchas avermelhadas e fissuras características.

Foi bastante perceptível a presença de fissuras com a configuração típica da corrosão, em especial na base dos pilares que se encontram em estado de deterioração (Figura 13 e Figura 14).

Esses problemas têm destaque nos edifícios mais antigos da instituição. Em locais mais críticos, a fissuração já avançou para situações de desagregação do cobrimento, deixando a armadura exposta ao ambiente, intensificando a ação de agentes agressores. Em alguns casos o aço exposto já se encontra em um estado avançado de degradação com corrosão aparente. (Figura 15, Figura 16 e Figura 17).

Figura 13 - O levantamento mostra fissura paralela à armadura do pilar



Fonte: AUTOR

Figura 14 - Fissuração na base do pilar com configuração paralela à armadura



Fonte: AUTOR

Figura 15 - Identificação de desagregação do concreto na base do pilar



Fonte: AUTOR

Figura 16 - Caso de expulsão do concreto, exposição da armadura e cobrimento inadequado



Fonte: AUTOR

Figura 17 - Exposição da armadura após expulsão do concreto de cobrimento



Fonte: AUTOR

A vistoria do local também foi importante para identificar intervenções que já haviam sido executadas, possivelmente para sanar esses problemas oriundos da corrosão. Diversos pilares passaram por restaurações, alguns reconstruídos totalmente e outros submetidos a restaurações localizadas, ocorrendo a visível percepção do concreto antigo e do que foi utilizado na correção (Figura 18). Entretanto, alguns pilares restaurados demonstraram apresentar novamente o mesmo problema de fissuração, dando a ideia de que a real causa da patologia não foi sanada e que a conduta selecionada para a intervenção não foi satisfatória. Provavelmente, falta de estudos prévios e de um diagnóstico bem elaborado podem ser as principais causas desse problema (Figura 19).

Figura 18 - Restauração com notória distinção entre o concreto original e o de restauração



Fonte: AUTOR

Figura 19 - Abertura de fissuras em pilares recuperados



Fonte: AUTOR

Outro ponto que chama atenção para o nível de degradação é a estrutura do reservatório de água fria. Por se tratar de um elemento em constante contato com a umidade, se faz necessário o uso de técnicas diferenciadas de execução e manutenção, baseadas em projetos de impermeabilização, de forma a garantir uma vida útil prolongada. Esses cuidados parecem não terem sido seguidos, pois a estrutura apresenta uma diversidade de pontos de corrosão e desagregação do concreto (Figura 20 e Figura 21).

Figura 20 - Corrosão da estrutura do reservatório



Fonte: AUTOR

Figura 21 - Fissuração e cobrimento inadequado na estrutura do reservatório



Fonte: AUTOR

Ao fim da inspeção visual pôde-se notar a quantidade de problemas que afligem a edificação referentes a corrosão.

Tendo em vista a importância da vida útil e de um plano de manutenção bem elaborado, um modelo de previsão de carbonatação se faz adequado a essa situação, a fim de comparar a situação real com a prevista pelo modelo. Com base nisso, se faz necessária a execução de

ensaios que determinem certos aspectos influentes no processo de carbonatação, com o intuito de serem aplicados ao modelo desenvolvido por Carmona (2005), auxiliado pelo software concebido pelo autor, intitulado “Carambola”. Para a aplicação desse modelo, são necessários dados a respeito do tipo de cimento utilizado na confecção do concreto, a resistência característica, o cobrimento utilizado e a concentração de CO₂ no ambiente.

Além disso, a aferição do cobrimento utilizado também é importante, objetivando conferir se está de acordo com a norma vigente no período da construção do edifício, tendo em vista a importância dessa barreira física na penetração de agentes agressivos, incluído o CO₂, principal responsável pela carbonatação, como também para a manutenção da alcalinidade que preserva a integridade da camada passivadora do aço.

3.2 ANAMNESE DO CASO

Esta fase do levantamento de subsídios se trata da coleta de dados a respeito de características do edifício, por meio de documentos existentes e depoimentos de pessoas relacionadas ao histórico da instituição. Para a presente pesquisa, esta etapa foi importante para obter informações relevantes quanto ao projeto estrutural da edificação e em relação aos processos de restauração que foram executados.

A priori, foi pedido junto à direção da instituição a autorização para a realização dos ensaios necessários. Entretanto, a concessão para a retirada de um corpo de prova que seria utilizado em um ensaio de compressão não foi permitida. Esse ensaio se mostra importante na verificação da resistência real do concreto, que nem sempre é igual a resistência de projeto.

Com a impossibilidade de executar a extração do corpo de prova do pilar, optou-se por utilizar a resistência característica do concreto que consta no projeto estrutural. Com isso, a gerência do *campus* foi requisitada, por meio da Diretoria de Administração, Planejamento e Finanças (DAPF) e da Diretoria de Ensino, no intuito de averiguar a existência desse projeto e a possibilidade de consulta. Entretanto, a instituição só estava de posse dos projetos arquitetônico e elétrico. Portanto, não foi possível por meio do instituto, nos fornecer os dados referentes a resistência característica e tipo de cimento utilizado, se tornando um ponto negativo na obtenção dos resultados.

Tendo em vista essa grande lacuna a ser preenchida, a atitude mais viável foi de estimar essas informações com base no que era utilizado na época de construção do *campus*. A respeito da resistência, os valores mais utilizados para esse dado se encontravam entre 15 e 18 MPa, foi

adotado então o valor de 16 MPa. Para a escolha do tipo de cimento, foi verificado que o software dispõe de três categorias para escolha: o Cimento Portland Comum (CPI), Cimento Portland de Alto Forno (CPIII) e CPIV. Dentre essas variedades, o mais provável de ter sido utilizado, levando em conta o que era mais empregado na época, é o CPI, portanto foi o escolhido para aplicação no software.

O segundo ponto a ser tratado nessa etapa foi a respeito das restaurações já feitas nos pilares. Foi consultada a DAPF do IFPB – Cajazeiras, que disponibilizaram fotos da execução dos reparos. Ainda de acordo com o que foi passado, esses procedimentos foram realizados em dezembro de 2015, devido a intensa degradação a que os pilares estavam sujeitos.

Ainda no tocante às restaurações feitas, foi consultado o pedreiro da instituição que foi o responsável pela execução das reparações, a respeito do procedimento realizado. Segundo ele, o processo iniciava com a retirada da camada do concreto de cobrimento, deixando o aço exposto. Em seguida a armadura em elevado estado de corrosão era lixada com o auxílio de uma escova metálica para a retirada dos produtos da reação. O passo seguinte era a aplicação de uma camada de zarcão, para proteger a armadura. Por último, a abertura era fechada com argamassa e feito o acabamento com nata de cimento. O pedreiro, no entanto, não recordava o traço utilizado na confecção dessa argamassa, apenas caracterizou como sendo “forte, de cor azulada”, isto é, com um teor elevado de cimento, também relatou que a areia utilizada era areia fina e lavada. Na Figura 22, disponibilizada pelo setor de planejamento do *campus*, podemos ver o processo de restauração na etapa de aplicação do produto anticorrosivo.

Figura 22 - Aplicação de zarcão no processo de restauração de pilar do IFPB – *Campus* Cajazeiras



Fonte: DAPF, IFPB – *CAMPUS* CAJAZEIRAS

Ainda em seu depoimento, o pedreiro responsável pela restauração alertou para o alto grau de degradação que se encontravam os pilares, com parte do concreto desagregado, deixando a armadura exposta, além de intensa fissuração. Quando o cobrimento do concreto era retirado, notava-se uma quantidade eminente de ferrugem. A armadura em alguns pontos se encontrava muito deteriorada, com significativa redução de seção transversal, sendo necessária, portanto, a substituição de parte desse material.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

A última etapa seguiu-se com a execução dos ensaios necessários para aplicação no modelo de previsão e a comparação com os resultados obtidos na prática. Como foi determinado na fase de vistoria do local, os ensaios são de profundidade de carbonatação, determinação da espessura do cobrimento e concentração de CO₂ no ambiente.

Como visto no passo anterior, não foi possível a obtenção das informações a respeito da resistência característica de projeto, nem do tipo de cimento empregado, devido a não autorização da retirada de um corpo de prova e da impossibilidade de consulta ao projeto estrutural, sendo esses dados estimados então em 16 MPa e cimento CPI.

3.3.1 Escolha dos Pilares para Estudo

Antes de prosseguir para a execução dos ensaios, se fez necessário um planejamento prévio a respeito dos locais a serem analisados. Optou-se por dividir as amostras em três grupos para um melhor entendimento do caso: pilares fissurados, pilares não fissurados e pilares restaurados.

Alguns fatores foram levados em consideração na escolha dos elementos a serem estudados. Primeiramente, no que se refere aos pilares fissurados, se deu preferência aqueles que estavam em um processo de intensa degradação. Outro fator importante abordado foi a escolha de amostras dos três grupos que estejam próximas, para melhores condições de comparação e menores variações de características ambientais.

Tendo em vista essas condições, o local adotado para a realização dos ensaios foi a zona que engloba o Bloco 4 da instituição e seus arredores, por compreender amostras de pilares tanto fissurados, como não fissurados e restaurados.

Foram escolhidos então dois pilares fissurados, dois não fissurados e um que foi submetido a restauração como amostras. Para evitar equívocos, os elementos estruturais foram nomeados, de acordo com sua classificação em Pilar Fissurado (PF) (Figura 23 e Figura 17), Pilar Não Fissurado (PNF) (Figura 24 e Figura 25) e Pilar Restaurado (PR) (Figura 26 e Figura 27). Na Figura 28, está representado um croqui da área que se concentrou a realização da pesquisa bem como a localização das amostras.

Figura 23 - Pilar Fissurado 1 (PF1)



Fonte: AUTOR

Figura 24 - Pilar Não Fissurado 1 (PNF1)



Fonte: AUTOR

Figura 25 - Pilar Não Fissurado 2 (PNF2)



Fonte: AUTOR

Figura 26 - Pilar Restaurado (PR)



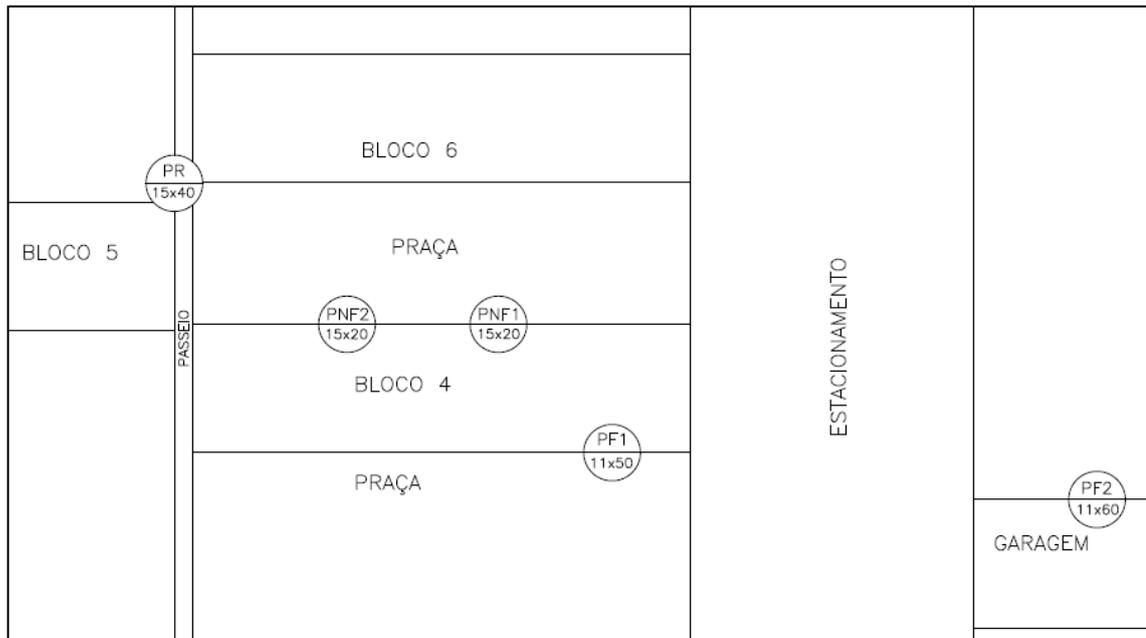
Fonte: AUTOR

Figura 27 - Reparação feita no PR em dezembro de 2015



Fonte: DAPF, IFPB – CAMPUS CAJAZEIRAS

Figura 28 - Localização das amostras escolhidas para realização dos ensaios



Fonte: AUTOR

3.3.2 Execução dos Furos

Para se ter uma melhor análise do comportamento da carbonatação ao longo do pilar, foi definida a abertura de dois furos em cada elemento, sendo um mais próximo da base e outro em uma posição mais intermediária, dessa forma, os resultados não vão estar atrelados a uma única análise, que pode conter distorções e será possível verificar se existem discrepâncias relevantes na mesma peça.

O procedimento de abertura dos furos para inspeção foi precedido da marcação do posicionamento da armadura no concreto, com o intuito de evitar desperdício de tempo e trabalho com a localização por meio de prospecção. Essa marcação foi feita com o auxílio de um pacômetro para localização da armadura e de uma caneta para delimitação (Figura 29, Figura 30 e Figura 31).

Figura 29 - Utilização do pacômetro para localização da armadura



Fonte: AUTOR

Figura 30 - Marcação do posicionamento da armadura por meio do pacômetro e de caneta



Fonte: AUTOR

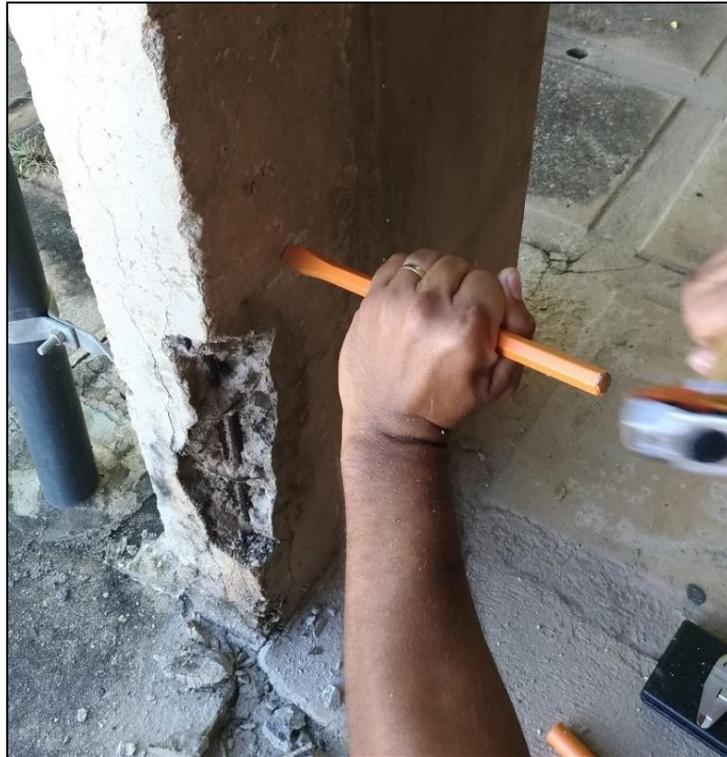
Figura 31 - Marcação da armadura realizada em pilar



Fonte: AUTOR

A seguir foi iniciada a execução da abertura dos furos nos locais marcados com a utilização de ponteira, talhadeira e marreta (Figura 32). A sequência das atividades se deu primeiramente com os pilares fissurados, seguidos dos não fissurados e do pilar restaurado.

Figura 32 - Abertura de furo com auxílio de ponteira, talhadeira e marreta



Fonte: AUTOR

Como o PF1 estava com um grau de deterioração bastante elevado, durante a execução da abertura do primeiro furo, na região inferior do pilar, parte do concreto foi expulso, como mostra a Figura 32, evidenciando assim a fragilidade com que se encontra esse elemento estrutural.

3.3.3 Ensaios

Foram três os ensaios realizados para a coleta dos dados necessários: profundidade de carbonatação, cobrimento da armadura e concentração de CO_2 . Como foi dito anteriormente, para que a aplicação no método de previsão seja mais precisa, seria necessário extrair um corpo de prova do elemento estrutural e realizar o ensaio de compressão. Entretanto, não foi possível a autorização para tal ato, sendo utilizado, portanto a resistência a compressão descrita no projeto estrutural.

O ensaio de determinação da profundidade de carbonatação foi realizado por meio da aspersão de uma solução de fenolftaleína. A fenolftaleína é caracterizada por sua mudança de cor entre os níveis de pH 8,3 e 10, indo de incolor em zona mais neutra para vermelho-carmim em um ambiente mais alcalino. Essa mudança de coloração detecta a profundidade da frente de carbonatação.

Figura 33 - Aplicação de solução de fenolftaleína na área de desagregação do concreto no PF1



Fonte: AUTOR

Após a aplicação da solução, a profundidade da frente carbonatada foi mensurada com o auxílio de um paquímetro. Vale salientar o fato de que o único efeito desagradável da carbonatação no concreto armado diz respeito a sua influência na corrosão de armaduras. Portanto, ao notar que a reação já atingiu o aço, não se via mais necessidade de aprofundar o ensaio além da espessura do cobrimento. Isso significa que o aço já se encontra despassivado.

O outro ensaio realizado foi para determinação da espessura do cobrimento da armadura. Além de ser um dos dados necessários para a aplicação no modelo de previsão, por sua elevada influência na proteção química e física da armadura, é importante ter ciência dessa espessura para verificar se está de acordo com a normatização da época de construção. A aferição foi feita mediante um paquímetro.

O último dado a ser coletado em campo foi a concentração de CO₂ na atmosfera, medida após a realização dos demais ensaios em cada pilar. A verificação foi feita por meio de um medidor de CO₂ eletrônico (Figura 34).

Figura 34 - Verificação da concentração de CO₂ no ar por meio de medidor eletrônico



Fonte: AUTOR

Ao final dos ensaios, as aberturas foram restauradas com argamassa de traço 1:3.

3.3.4 Aplicação do Método de Previsão de Carbonatação

Como foi dito anteriormente, Carmona (2005) estudou os diversos modelos de previsão de carbonatação e desenvolveu um software para esse cálculo, denominado Carambola, baseado no modelo que julgou ser mais eficiente e que abrangesse o maior número de variáveis (Figura 35). Esse modelo foi usado para o cálculo teórico do tempo em anos para que a despassivação por meio da carbonatação ocorra.

Figura 35 - Tela principal do software Carambola

Fonte: CARMONA, 2005

O software disponibiliza duas opções de cálculo, que se baseiam em métodos deterministas e probabilistas. O método probabilista considera como hipótese que a carbonatação e o cobrimento seguem distribuições normais, refinando assim os cálculos.

Como é afirmado por Possan (2010), as metodologias para previsão de vida útil de estruturas com base em teorias probabilistas são mais confiáveis, por abranger a aleatoriedade dos diversos fatores envolvidos. Portanto, será utilizada essa abordagem para aplicação no software.

Para a utilização desse método, o software Carambola exige três dados de entrada: coeficiente de variação do cobrimento, coeficiente de variação da carbonatação e a probabilidade de despassivação. Os coeficientes de variação podem ser facilmente calculados pela seguinte fórmula:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (21)$$

Sendo:

CV = Coeficiente de variação

σ = Desvio padrão

μ = Média dos dados

Já a probabilidade de despassivação é dada pela hipótese da função limite G , que é determinada a partir da subtração entre as curvas de probabilidade dos cobrimentos e da carbonatação. Quando a função G é negativa, significa que a curva de probabilidade dos cobrimentos é menor que a da carbonatação e possivelmente ocorra a despassivação. Portanto, a probabilidade de despassivação, de acordo com Carmona (2005) é:

$$P(G < 0) \quad (22)$$

Para o cálculo dessa probabilidade, utiliza-se a função reduzida g , para que possa ser utilizada a tabela de distribuição normal padrão. Essa função é dada por:

$$g = \frac{0 - \mu_G}{\sigma_G} \quad (23)$$

Sendo:

$$\mu_G = \mu_{carb.} - \mu_{cob.} \quad (24)$$

$$\sigma_{carb.} = \mu_{carb.} - CV_{carb.} \quad (25)$$

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_{carb.}^2 + \sigma_{cob.}^2} \quad (26)$$

Logo:

$$g = \frac{0 - (\mu_{carb.} - \mu_{cob.})}{\sqrt{(\mu_{carb.} - CV_{carb.})^2 + \sigma_{cob.}^2}} \quad (27)$$

Desse modo, utilizando as tabelas de distribuição normal padrão, a probabilidade de despassivação pode ser dada como:

$$P(G < 0) = P(Z < g) \quad (28)$$

Todos os dados colhidos através dos ensaios e da anamnese foram aplicados ao software, juntamente com os dados probabilísticos, calculando para cada pilar a profundidade de carbonatação e o tempo teórico até a despassivação. Por fim, foram comparados os dados de saída do programa com os colhidos em campo, atingindo assim o objetivo da pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma melhor organização dos dados, os resultados foram divididos de acordo com os grupos definidos na pesquisa, apresentando para cada elemento estrutural a análise feita em campo e o que foi calculado pelo modelo de previsão utilizado.

Como foi mencionado anteriormente, em cada pilar foram executados dois furos para inspeção, portanto, para a aplicação no software e efeitos de comparação, será utilizada a média aritmética dos valores encontrados para profundidade de carbonatação e espessura do revestimento.

Além da comparação com os resultados apresentados pelo software, também será verificado se os revestimentos estão de acordo com especificado pela norma vigente na época de construção do instituto, a ABNT NBR 6118:1980. De acordo com esta norma, para estruturas de concreto aparente, que estejam localizadas no ambiente externo, o revestimento mínimo recomendado é de 25 mm.

4.1 PILARES FISSURADOS

Como visto na Figura 33, a abertura do primeiro furo no PF1 provocou uma desagregação de parte do concreto de revestimento, que se encontrava em estado de elevada fissuração. Esse ocorrido indesejado foi utilizado para a verificação da profundidade de carbonatação naquele local. Como era de se esperar, pelo nível de deterioração que a peça estava submetida, toda a área se encontrava carbonatada.

Prosseguiu-se então com a abertura dos furos nas alturas de 18 e 120 centímetros em relação ao piso. O ensaio de carbonatação mostrou que ambas as aberturas se encontravam totalmente carbonatadas, como mostra a Figura 36 e a Figura 37.

Figura 36 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF1, furo a 18 cm do piso



Fonte: AUTOR

Figura 37 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF1, furo a 120 cm do piso



Fonte: AUTOR

No PF2, os furos foram abertos nas alturas de 49 e 149 centímetros em relação ao piso. Assim como no primeiro pilar, foi observada uma situação de total carbonatação no interior da

peça, havendo mudança de cor apenas no furo inferior, no entanto em uma região posterior a armadura, mostrando que a carbonatação já havia atingido o aço (Figura 38 e Figura 39).

Figura 38 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF2, furo a 49 cm do piso



Fonte: AUTOR

Figura 39 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PF2, furo a 149 cm do piso



Fonte: AUTOR

Os resultados dos ensaios estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados referentes aos Pilares Fissurados

PILAR	ALTURA DO FURO (cm)	COBRIMENTO (mm)	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (mm)		CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ (%)
			Média	Média	
PF1	18	22,40	Média	22,40	0,0450
	120	23,75	23,08	23,75	
PF2	49	24,35	Média	24,35	0,0408
	149	20,40	22,38	20,40	

Fonte: AUTOR

Como já foi dito anteriormente, não houve necessidade de continuar o ensaio para determinar a profundidade exata de carbonatação, já que esta já atingiu a armadura e por isso provavelmente já provocou a despassivação. Dessa forma, foi considerado que a profundidade de carbonatação seria igual ao cobrimento e que a armadura provavelmente estaria despassivada.

Como pode ser observado na Tabela 1, nenhum cobrimento atingiu o recomendado pela norma da época de construção, que seria 25 mm. Também é possível notar que a concentração de CO₂ se mostrou relativamente baixa, semelhante à de um ambiente rural, que está

compreendida entre 0,03 e 0,05% como afirma Helene (1993), e de baixa relevância, de acordo com Possan (2010), por ser menor que 0,1%. Portanto, pode-se dizer que não se trata de um meio agressivo no que se refere a presença de CO₂ no ar. Esse fato pode ser explicado pela presença considerável de vegetação no *campus*.

O cálculo da previsão de carbonatação está resumido na Tabela 2.

Tabela 2 - Cálculo da profundidade estimada de carbonatação para os Pilares Fissurados

PILAR	COBRIMENTO (mm)		CARBONATAÇÃO (mm)		PROBAB. DE DESP. (%)	CARBONATAÇÃO ESTIMADA (mm)	TEMPO ATÉ DESP. (anos)
	MÉDIA (mm)	CV (%)	MÉDIA (mm)	CV (%)			
	PF1	23,08	4,12	23,08			
PF2	22,38	0,12	22,38	0,12	50	16,93	49,53

Fonte: AUTOR

Considerando o início da construção do instituto em dezembro de 1989, é plausível especular o ano de execução dos pilares estudados como sendo em 1990, possuindo uma idade de 28 anos em 2018. A “Carbonatação estimada” mostrada na tabela acima seria a profundidade da frente de carbonatação estimada pelo software no ano de 2018, passados 28 anos de sua construção. Esse valor é o que deve ser comparado à média das espessuras de carbonatação aferidas nos pilares. De acordo com a tabela, a profundidade de carbonatação estimada é menor do que a aferida na realidade nos dois casos. Também é observado que, de acordo com os dados de saída do software, a despassivação nos Pilares Fissurados 1 e 2 é prevista apenas para 2037 e 2039, respectivamente, muito além da realidade em que já se encontram em estado de corrosão.

4.2 PILARES NÃO FISSURADOS

Os pilares não fissurados escolhidos encontram-se no mesmo bloco do PF1, portanto incluídos em atmosferas semelhantes. As aberturas no PNF1 se deram a alturas de 41 e 146 centímetros a partir do piso. Mesmo não apresentando sinais de degradação, o ensaio determinou que toda a espessura do cobrimento estava carbonatada, assim como os pilares que manifestaram fissuras (Figura 40 e Figura 41).

Figura 40 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF1, furo a 41 cm do piso



Fonte: AUTOR

Figura 41 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF1, furo a 146 cm do piso



Fonte: AUTOR

Prosseguindo para o PNF2, situação semelhante foi observada. Toda a espessura de cobertura estava carbonatada, mesmo o pilar não apresentando sinais de corrosão. As aberturas foram executadas a 64 e 153 centímetros do piso (Figura 42 e Figura 43).

Figura 42 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF2, furo a 64 cm do piso



Fonte: AUTOR

Figura 43 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PNF2, furo a 153 cm do piso



Fonte: AUTOR

Os resultados importantes da análise feita nos pilares sem degradação estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados referentes aos Pilares Não Fissurados

PILAR	ALTURA DO FURO (cm)	COBRIMENTO (mm)	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (mm)		CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ (%)
			Média	Média	
PNF1	41	24,15	Média	24,15	0,0421
	146	18,90	21,52	18,90	
PNF2	64	19,90	Média	19,90	0,0421
	153	17,60	18,75	17,60	

Fonte: AUTOR

Da mesma forma que nos pilares fissurados, a profundidade de carbonatação se igualou a do cobrimento, dessa forma, provavelmente a armadura estaria despassivada. Entretanto, não apresentou sinais de corrosão, esse fato é extremamente plausível, uma vez que o processo de corrosão depende não só da proteção química oferecida pela película passivadora, mas também de diversos outros aspectos que incluem fatores ambientais e características da matriz do concreto.

Mais uma vez o cobrimento verificado na prática não está de acordo com a normatização e apresenta discrepâncias em uma mesma peça, como pode ser observado no PNF1 que expressa uma diferença de 5,25 mm no cobrimento entre os furos.

Também é possível analisar que a concentração de CO₂ não sofreu alterações, principalmente pelo fato da proximidade dos dois elementos. Além disso, são níveis de concentração baixos que não oferecem uma agressividade preocupante ao meio.

Referente a previsão da carbonatação, os resultados obtidos pelo software estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Cálculo da profundidade estimada de carbonatação para os Pilares Não Fissurados

PILAR	COBRIMENTO (mm)		CARBONATAÇÃO (mm)		PROBAB. DE DESP. (%)	CARBONATAÇÃO ESTIMADA (mm)	TEMPO ATÉ DESP. (anos)
	MÉDIA (mm)	CV (%)	MÉDIA (mm)	CV (%)			
PNF1	21,53	0,17	21,53	0,17	50,00	16,93	44,42
PNF2	18,75	0,09	18,75	0,09	50,00	16,93	33,69

Fonte: AUTOR

Assim como nos pilares fissurados, neste caso o tempo previsto para a despassivação da armadura foi superior ao visto na prática. De acordo com o software, a frente de carbonatação

somente atingiria o aço dos Pilares Não Fissurados 1 e 2 em 2034 e 2023, respectivamente, não condizente com a situação atual de deterioração.

4.3 PILAR RESTAURADO

O pilar escolhido para ser feita essa análise passou por um processo de restauração parcial, em que apenas parte do elemento foi alterado, por esse motivo, a distância entre as aberturas não pôde ser muito grande. Entretanto, a peça ainda apresentava pequenas fissuras na área reparada. Além disso, para uma melhor análise de como foi feita a restauração, os furos foram executados na localização dos estribos e da armadura longitudinal a 72 e 62 centímetros do piso, respectivamente.

A aplicação da solução de fenolftaleína provocou uma reação, alterando sua cor, demonstrando que a alcalinidade se mantém (Figura 44 e Figura 45).

Figura 44 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PR, furo a 72 cm do piso



Fonte: AUTOR

Figura 45 - Aplicação da solução de fenolftaleína no PR, furo a 62 cm do piso



Fonte: AUTOR

Um aspecto importante observado foi a facilidade de perfuração no concreto utilizado para restauração, se mostrando bastante quebradiço. Com a abertura dos dois furos, uma fissura foi aberta entre eles e entre o furo inferior e a divisão entre a área restaurada e o concreto original, como pode ser percebido na Figura 45.

Um fenômeno interessante ocorreu com o ensaio executado no furo da armadura longitudinal. A reação da solução indicou que a parte do concreto restaurado continua sim com alta alcalinidade, entretanto na zona que se encontra logo após a armadura, a fenolftaleína não reagiu, como pode ser visto na Figura 45, denunciando que aquela região já está carbonatada. É possível concluir então que no processo de restauração, essa parte do concreto junto a armadura longitudinal não foi retirada.

Os demais resultados a respeito do pilar restaurado estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados referentes ao Pilar Restaurado

PILAR	ALTURA DO FURO (cm)	COBRIMENTO (mm)	PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (mm)		CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ (%)
			Média	Média	
PR	72	14,70	Média	4,20	0,0421
	62	19,85	17,28	2,00	

Fonte: AUTOR

Nesta situação o cobrimento também não foi o adequado, sendo de 14,70 milímetros no local do estribo, 10,30 milímetros a menos do que o recomendado por norma. A concentração de CO₂ não sofreu alterações em relação aos pilares não fissurados em virtude da proximidade entre eles.

Não se fez necessário aplicar o software para previsão de carbonatação nesse caso, uma vez que o elemento estrutural já passou por uma intervenção e a profundidade de carbonatação não condiz com a que deveria ser desde a época de sua construção.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados e no que foi discutido ao longo do presente trabalho, é possível observar alguns fatores importantes, descritos a seguir.

O objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que foi feita a comparação da profundidade de carbonatação prevista em um software com uma situação real. Através dessa comparação, concluiu-se que houve uma considerável discrepância entre os dados, nos quais, de acordo com os resultados da previsão, a despassivação da armadura deveria ocorrer muito depois do período em que ocorreu na realidade, sendo que, na situação atual, diversos elementos estruturais já até precisaram passar por um processo de restauração, devido ao avançado estado de deterioração que se encontrava a peça.

Esta divergência pode ter ocorrido como uma resultante de fatores específicos, que podem ter influenciado para o avanço mais acelerado da reação. Um estudo mais profundo a respeito dos aspectos naturais influenciadores e a realização de ensaios para caracterização do material seria necessário para uma definição melhor do problema.

Outro fator que pode ter influenciado nesta discrepância foi a falta de informações a respeito da resistência do concreto e do tipo de cimento. Como foi explicado na execução, esses dados não foram possíveis de serem obtidos, sendo necessário, portanto, uma estimativa com base no que era mais utilizado na época. Essa hipótese foi um ponto negativo de relevante interferência nos resultados. O fato de os valores de saída do software indicarem um período até a despassivação maior do que o tempo real, pode sugerir que a resistência característica do concreto tem um valor inferior ao de 16 MPa, que foi o estimado. Essa resistência poderia ser aferida por meio de ensaios não destrutivos, entretanto a aquisição do equipamento para execução de tais ensaios não foi possível.

É importante destacar que a frente de carbonatação pode estar mais avançada do que o que foi aferido, já que o ensaio para determinação dessa característica se preocupou apenas em determinar essa profundidade até a espessura do cobrimento, tendo em vista que o principal componente afetado pela carbonatação é a armadura.

Foi percebido que em nenhum dos elementos estruturais analisados foram respeitadas as recomendações da norma vigente da época de construção em relação ao cobrimento mínimo considerado, aumentando significativamente a facilidade dos agentes agressores, a exemplo do CO₂, atingirem a armadura em um tempo menor que o previsto na vida útil.

Todos os pilares examinados que não passaram por nenhum método de intervenção encontram-se com o processo de carbonatação avançado, chegando a atingir a armadura e, possivelmente, desfazendo a camada de proteção química, deixando o aço suscetível ao desenvolvimento da corrosão.

No pilar restaurado, foi analisado que no procedimento de intervenção apenas a camada de revestimento do concreto foi retirada, deixando a parte posterior a armadura ainda carbonatada. No entanto a armadura se encontra protegida, uma vez que os agentes agressivos ainda estão penetrando a argamassa utilizada na reposição do revestimento.

A concentração do gás carbônico na atmosfera se mostrou semelhante em cada pilar, deduzindo que o ambiente seja similar em se tratando de agressividade, que se mostrou baixa, quando comparada a áreas de centros urbanos com tráfego intenso.

Entretanto, mesmo em ambientes com concentrações de CO₂ semelhantes e com frentes de carbonatação atingindo a armadura, alguns pilares se encontram com indícios de corrosão e outros não. Essa situação pode ser explicada pelo fato de que a destruição da película passivadora é necessária para que ocorra a corrosão, mas não é o único fator essencial. Como foi visto no referencial teórico, diversos são os requisitos para que a reação se manifeste, incluindo aspectos relacionados à matriz de cimento, que precisaria de ensaios mais minuciosos para determinação. Mas algumas diferenças nos ambientes em que os pilares fissurados e não fissurados se encontravam já puderam ser notadas, principalmente a respeito da umidade. Os pilares não fissurados são bem menos suscetíveis a esse tipo de agressividade em relação aos outros, em consequência de aspectos arquitetônicos da edificação.

A utilização de softwares e modelos matemáticos com o objetivo de estimar a vida útil de um sistema estrutural visa contribuir para o decréscimo da ocorrência desse fenômeno. Entretanto, é essencial que engenheiros e arquitetos colaborem com essa importante tarefa, através de medidas preventivas que se originam desde a fase de projeto. Com isso, é possível obter edificações mais duradouras, evitando transtornos e, acima de tudo, garantindo segurança para a sociedade.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Carmen. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Pini, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - **NBR 6118**: Projeto e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro, 1980.
- BAZZAN, G. C. G. **Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo**. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.
- CARMONA, THOMAS G. **Modelos de Previsão da Despassivação das Armaduras em Estruturas de Concreto Sujeitas à Carbonatação**. São Paulo, Universidade de São Paulo PCC. USP, 2005 (Dissertação Mestrado).
- CUNHA, Ana Carla Quintas da; HELENE, Paulo RL. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. EPUSP, 2001.
- E-CIVIL. **Corrosão de armaduras**. Disponível em:
<http://www.ecivilnet.com/artigos/corrosao_de_armaduras.htm>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- FIGUEIREDO, Enio P.; MEIRA, Gibson R. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. México: Boletim técnico ALCONPAT Internacional, v. 6, 2013.
- FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. Curitiba, 2005. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná.
- HELENE, Paulo RL. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, v. 231, p. 14, 1993.
- HELENE, Paulo RL. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Anais... Porto Alegre, RS. 1997.
- LICHTENSTEIN, Norberto B. **Patologia das construções**. Boletim Técnico, v. 6, p. 86, 1986.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MEHTA, P. Kumar. **Concrete technology at the crossroads - problems and opportunities**. Special Publication, v. 144, p. 1-30, 1994.
- MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal; PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente construído: revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre. vol. 7, n. 4 (Out./Dez. 2007), p. 7-20, 2007.

MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto; PEREIRA, Victor Correia de Oliveira. **Avaliação da capacidade de proteção de adições minerais em relação à corrosão de armaduras devido à carbonatação.** Construindo, v. 3, n. 01, 2011.

NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante do. **Corrosão em armaduras de concreto.** Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 3, n. 1, p. 177-188, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo. PINI, 1997.

PINA, Gregório Lobo de. **Patologia nas habitações populares.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

POGGIALI, F. S. J. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas.** Belo horizonte, 2009.

POLITO, Giuliano. **Corrosão Em Estruturas De Concreto Armado: Causas, Mecanismos, Prevenção E Recuperação.** 188 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** 2010. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

RIPPER, Thomaz; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998.

ROCHA, Ivan. **Corrosão em estruturas de concreto armado.** Revista Especialize, Goiânia, v. 1, p. 1-26, 2015.

SANTOS, Aleílson Vilas-bôas dos. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação.** Revista Especialize online, Salvador, v. 10, 2015.

THOMAZ, Ercio. **Trincas de edifícios: causas, prevenção e recuperação.** Pini, 1989.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete.** Stokholm, 1982. 469p. Swedish Cement and Concrete Research, Fo n° 504.

VAGHETTI, M.A.O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais.** Tese de doutorado. Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: 2005, 274 p.

VIEIRA, F.M.P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.