

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Casemiro Mior Júnior

**DETERIORAÇÃO DE ELEMENTOS DE COBERTURA EM
CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO COM ENFOQUE NA
CORROSÃO DE ARMADURAS**

Porto Alegre
julho 2013

CASEMIRO MIOR JÚNIOR

**DETERIORAÇÃO DE ELEMENTOS DE COBERTURA EM
CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO COM ENFOQUE NA
CORROSÃO DE ARMADURAS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Alexandra Cruz Passuello
Coorientador: João Luiz Campgnolo

Porto Alegre
julho 2013

CASEMIRO MIOR JUNIOR

**DETERIORAÇÃO DE ELEMENTOS DE COBERTURA EM
CONCRETO ARMADO: DIAGNÓSTICO COM ENFOQUE NA
CORROSÃO DE ARMADURAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelos Orientadores e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2013

Alexandra Cruz Passuello
Dra. pela Università Politecnica
delle Marche
Orientadora

João Luiz Campagnolo
Mestre pela Universidade
Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Alexandra Cruz Passuello
Dra. pela Università Politecnica
delle Marche

João Luiz Campagnolo
Mestre pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Ângela Gaio Graeff
Dra. pela Universidade de Sheffield

Luciane Fonseca Caetano
Mestre pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora a Doutora Alexandra Cruz Passuello pelo tempo dedicado a este trabalho, pelas valiosas sugestões e conselhos, pelo apoio com os ensaios, por sempre incentivar a buscar melhorias no trabalho e pela disponibilidade de responder às dúvidas e questionamentos.

Agradeço ao professor João Luiz Campagnolo por aceitar fazer parte deste trabalho, pelas indicações dos caminhos a seguir e pelos conhecimentos passados durante as aulas de patologia das construções.

Agradeço a professora Carin Schmitt por todo o auxílio e dedicação durante este trabalho e pela paciência para resolver dúvidas em todos horários.

Agradeço a toda à equipe do LEME pela ajuda durante a realização dos ensaios e pela disponibilidade.

Agradeço a minha namorada Édina pela paciência durante todo o desenvolvimento deste trabalho, pela força durante as horas mais difíceis, pelo apoio incondicional durante toda faculdade e por acreditar na minha capacidade.

Agradeço a minha família pelo apoio durante o período da faculdade.

Agradeço aos meus amigos Nathaniel, Fábio e Eduardo pelas risadas, conversas e apoio durante a faculdade.

Agradeço ao meu grande amigo Fábio Oliveira pela companhia nas noites de estudo, pela amizade tanto dentro quanto fora da faculdade e pelo incentivo durante a realização deste trabalho.

Agradeço a Lysiane Pacheco pela disponibilidade e ajuda durante o trabalho de conclusão.

Agradeço aos meus colegas de turma pelos momentos juntos e amizade incomparável, especialmente aos meus amigos Vinicius Bouffleur, Priscila da Rosa, Tânia Torres, Bruna Grochot e Lucas Schlatter.

Todo mundo é um gênio, mas se você julgar um peixe por sua capacidade de subir em uma árvore, ela vai gastar toda a sua vida acreditando que ele é estúpido.

Albert Einstein

RESUMO

A corrosão das armaduras é um problema que surge frequentemente nas estruturas de concreto armado. Neste trabalho foram estudadas diversas referências bibliográficas acerca das principais causas, sintomas e consequências da deterioração causada pela corrosão. Foi verificada a importância dos diversos fatores que podem ser controlados em projeto, com destaque especial ao cobrimento e às especificações do concreto, além de outros que merecem cuidados especiais durante a fase de execução. Partindo da bibliografia revisada buscaram-se quais os ensaios mais adequados a serem executados e em conjunto com o LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais) foi possível realizar os ensaios de potencial de corrosão, análise de cloretos e análise da profundidade carbonatada, reunindo assim uma base de dados que abrange as principais causas da corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado. No ensaio de caracterização da profundidade carbonatada foi possível verificar a ocorrência do efeito da carbonatação, que em muitos casos já despassivou a armadura e deu início ao processo corrosivo. Através dos ensaios de análise de cloretos no concreto foi possível chegar a conclusão de que havia uma quantidade quase desprezível de cloretos no concreto, evidenciando que a corrosão não foi promovida por estes íons. No ensaio de potencial de corrosão foi possível verificar as regiões no interior do concreto que estavam mais propensas ao processo de corrosão e determinar sua extensão. Através destes dados foi possível chegar a um diagnóstico relativo ao estado de conservação dos elementos de cobertura na passarela localizada em frente ao LEME no setor 4 do Campus do Vale da UFRGS. Após a análise dos dados e da realização do diagnóstico da estrutura foram indicadas possíveis intervenções, sem realizar uma análise mais aprofundada e limitando-se ao aspecto visual e aos resultados obtidos nos ensaios.

Palavras-chave: Corrosão de Armaduras. Diagnóstico Utilizando Ensaios de Cloretos. Efeitos da Carbonatação no Concreto. Corrosão por Carbonatação nas Coberturas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do delineamento da pesquisa.....	17
Figura 2 – Cálculo da vida útil da estrutura.....	20
Figura 3 – Identificação dos tipos de corrosão.....	21
Figura 4 – Exemplo de corrosão da armadura na cobertura.....	22
Figura 5 – Exemplo de corrosão em uma estrutura de concreto.....	22
Figura 6 – Regiões anódicas e regiões catódicas.....	24
Figura 7 – Efeito de pilha.....	25
Figura 8 – Delimitação das faixas de passivação, corrosão e imunidade em função do pH.....	27
Figura 9 – Estágios do processo de corrosão da armadura.....	32
Figura 10 – Fissuração devido ao posicionamento incorreto da armadura.....	34
Figura 11 – Exemplo de lixiviação na cobertura.....	35
Figura 12 – Processo de carbonatação no concreto.....	37
Figura 13 – Evolução da carbonatação no concreto.....	38
Figura 14 – Relações entre espessura carbonatada e parâmetros do concreto e do ambiente.....	39
Figura 15 – Modelo para realização do diagnóstico.....	41
Figura 16 – Ensaio de corrosão abordados.....	44
Figura 17 – Procedimentos a se seguir para determinação da espessura carbonatada.....	46
Figura 18 – Exemplo da medição da espessura carbonatada.....	47
Figura 19 – Variação da coloração da fenolftaleína de acordo com a variação do pH.....	48
Figura 20 – Cálculo da velocidade de carbonatação e estimativa da vida útil.....	49
Figura 21 – Determinação de cloretos.....	52
Figura 22 – Eletrodo de referência de cobre.....	53
Figura 23 – Determinação do potencial de corrosão.....	54
Figura 24 – Ensaio de medida de potencial de corrosão.....	55
Figura 25 – Mapa de potencial de corrosão.....	56
Figura 26 – Localização do setor 4 no Campus do Vale.....	57
Figura 27 – Localização dos pontos ensaiados na passarela em relação ao LEME no Campus do Vale.....	58
Figura 28 – Representação de um módulo de cobertura da passarela.....	59
Figura 29 – Remoção de uma parte lateral do concreto.....	60
Figura 30 – (a) aspersão da solução em uma parte de concreto exposta (b) medição da profundidade carbonatada.....	60

Figura 31 – (a) medição da frente carbonatada e (b) exemplo de concreto carbonatado..	61
Figura 32 – (a) aspersão do nitrato de prata na superfície do concreto e (b) retrato da superfície após o ensaio colorimétrico.....	62
Figura 33 – (a) esmagamento do concreto e (b) passagem do pó de concreto pela peneira de 2,36 mm.....	63
Figura 34 – Acondicionamento das amostras.....	63
Figura 35 – (a) passagem da amostra pelo filtro e (b) diluição com o uso da micropipeta.....	64
Figura 36 – Colocação da amostra no cromatógrafo.....	65
Figura 37 – Localização da área do ensaio na estrutura.....	66
Figura 38 – (a) localização da armadura e (b) limpeza da armadura com escova de aço.	66
Figura 39 – (a) limpeza da armadura com acetona e (b) colocação do grampo metálico junto à armadura.....	67
Figura 40 – (a) marcação do grid com a trena e (b) grid marcado com giz.....	67
Figura 41 – Molhagem da laje.....	68
Figura 42 – (a) aparelho para medição de potencial e (b) realização do ensaio com o aparelho CPV-4.....	68
Figura 43 – Representação das estruturas carbonatadas.....	70
Figura 44 – Representação do percentual das armaduras das coberturas carbonatadas....	71
Figura 45 – (a) cobertura do ponto 2 e (b) cobertura do ponto 3.....	72
Figura 46 – Ensaio colorimétrico de cloretos nos pontos de numero 1 até 7.....	73
Figura 47 – Localização dos pontos ensaiados na passarela em relação ao LEME no Campus do Vale.....	76
Figura 48 – Mapa equipotencial do ponto 1.....	77
Figura 49 – Cobertura referente ao ponto 1.....	78
Figura 50 – Mapa equipotencial do ponto 2.....	79
Figura 51 – Cobertura referente ao ponto 2.....	79
Figura 52 – Mapa equipotencial do ponto 3.....	80
Figura 53 – Cobertura referente ao ponto 3.....	81
Figura 54 – Mapa equipotencial do ponto 4.....	82
Figura 55 – Cobertura referente ao ponto 4.....	82
Figura 56 – Mapa equipotencial do ponto 5.....	83
Figura 57 – Cobertura referente ao ponto 5.....	84
Figura 58 – Mapa equipotencial do ponto 6.....	85
Figura 59 – Cobertura referente ao ponto 6.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental.....	30
Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal.....	31
Tabela 3 – Tipos de ensaios e suas vantagens e limitações.....	44
Tabela 4 – Medidas de profundidade carbonatadas.....	70
Tabela 5 – Resultados do ensaio de análise química do concreto.....	75

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

NBR – Norma Brasileira

pH – Potencial Hidrogeniônico

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

SO₂ – Dióxido de Enxofre

Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio

CO₂ – Dióxido de Carbono

O₂ – Oxigênio Molecular

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	16
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	16
2.3 PREMISSA.....	16
2.4 DELIMITAÇÕES.....	16
2.5 LIMITAÇÕES.....	17
2.6 DELINEAMENTO.....	17
3 PROCESSO CORROSIVO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO...	19
3.1 DURABILIDADE EM ELEMENTOS DE CONCRETO.....	19
3.2 PROCESSO CORROSIVO.....	20
3.2.1 Início e desenvolvimento do processo de corrosão.....	21
3.2.2 Proteção química das armaduras.....	26
3.2.3 Proteção física.....	28
3.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS CAUSADAS PELA CORROSÃO.....	31
3.3.1 Fissuração.....	31
3.3.2 Desagregação do concreto.....	34
3.4 FATORES PROMOTORES DA CORROSÃO.....	36
4 INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.....	40
4.1 INSPEÇÃO PRELIMINAR.....	42
4.2 PLANO DE INSPEÇÃO DETALHADA.....	43
4.2.1 Ensaios para a caracterização da profundidade de carbonatação.....	45
4.2.2 Ensaios químicos para identificação de íons cloreto.....	49
4.2.2.1 Ensaio Colorimétrico para Determinação de Íons Cloreto.....	50
4.2.2.2 Ensaio de Análise Química de Íons Cloreto.....	50
4.2.3 Ensaio para avaliação do potencial de corrosão.....	52
5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	57
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	59
5.2 IDENTIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE ÍONS CLORETO.....	61
5.2.1 Ensaio colorimétrico para determinação de íons cloreto.....	61
5.2.2 Ensaio de análise química de íons cloreto.....	62
5.3 ENSAIO PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO.....	65
6 RESULTADOS E DIAGNÓSTICO DO NÍVEL DE DETERIORAÇÃO.....	69

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA.....	69
6.2 IDENTIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE ÍONS CLORETO.....	72
6.2.1 Ensaio colorimétrico para determinação de íons cloreto.....	72
6.2.2 Ensaio de análise química de íons cloreto.....	75
6.3 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO.....	76
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o concreto armado é o material mais empregado na construção civil brasileira. Dentre seus diversos empregos, este material é utilizado na execução de vigas, pilares, paredes, coberturas entre outros elementos. Segundo Pedroso (2012, p. 14), são consumidas mundialmente por volta de 11 bilhões de toneladas de concreto ao ano, sendo que no Brasil o volume concreto que é dosado nas centrais fica perto de 30 milhões de metros cúbicos ao ano.

Devido as suas múltiplas utilidades e crescente uso nas construções, é necessário que as estruturas feitas com este material possam ser utilizadas com certa margem de segurança. Para que se alcance este nível desejado de confiabilidade da estrutura, foram desenvolvidos diversos trabalhos e pesquisas voltadas à determinação dos pontos fracos e fortes do concreto armado. Neste quesito, a corrosão das armaduras se destaca como um dos principais pontos negativos, podendo, em uma etapa avançada, levar à ruína da estrutura.

Segundo Bertolini (2010, p. 161), o concreto armado deixa de ser estruturalmente seguro quando atinge níveis altos de deterioração relacionados a um processo corrosivo. Entretanto, antes de atingir este estado limite, a estrutura apresenta de modo geral o aparecimento de diversas manifestações patológicas. Quando isto ocorre, o elemento estrutural já iniciou o processo de corrosão que irá levá-lo a atingir seu limite de vida útil e dentre os agentes que interagem com o concreto neste processo, um dos principais é o tipo de ambiente.

Isso ocorre porque, como afirma Helene (1986, p. 1), grande parte dos danos causados às estruturas se refere ao meio ambiente no qual a estrutura está inserida. Quanto mais úmida e contaminada por ácidos ou outros agressores, como o dióxido de carbono e íons cloreto, menor tenderá a ser a vida útil do concreto armado. Outro ponto a ser abordado é a microrregião da estrutura, na qual está situada a peça. Devido à exposição direta da cobertura ao sol, haverá um ciclo de molhagem e secagem, que deverá ser levado em conta, pois tende a ocorrer a diminuição da vida útil da estrutura, por conta do ciclo mais acelerado de corrosão.

Dentro desse contexto, é visto que as estruturas de concreto armado apresentam diversos sintomas como indicativo de corrosão, como por exemplo, deslocamento do concreto, manchas de umidade e desagregação do concreto. Este fato deve ser cuidadosamente

analisado, uma vez que o concreto fornece proteção à armadura, evitando que a mesma esteja em contato com o meio agressor. Uma vez que a armadura esteja desprotegida, a estrutura não opera dentro dos padrões definidos em projeto, podendo ocasionar problemas estruturais (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 119-120).

Como há um desgaste natural das estruturas ao longo do tempo, é necessário que se façam diversas inspeções ao longo do período de vida útil da estrutura. Estas vistorias visam avaliar como está o grau de conservação da estrutura com relação ao ambiente que ela se encontra e com relação às solicitações da estrutura. As vistorias também devem ser usadas para estimar com base nas informações adquiridas o tempo que levará até a estrutura necessitar de algum tipo de reforma ou manutenção, e verificar a necessidade de algum reforço urgente na estrutura em função dos processos de deterioração sofridos.

Estudos realizados por Dal Molin (1988, p. 146) no Rio Grande do Sul, mostram que dentre as manifestações patológicas que ocorrem no concreto armado e que são considerados como graves (que geram algum tipo de dano à estrutura), 40% são oriundas do processo de corrosão das armaduras. Este número é bastante alto, e é um dos principais fatores que levam ao estudo com maiores detalhes de que maneira acontece o processo corrosivo.

Torres (2006, p. 36-37) cita que se distinguem duas fases no processo de corrosão, ou seja, os períodos de iniciação e de propagação. O presente trabalho visa avaliar qual o grau de intensidade do processo corrosivo dessas estruturas e qual a origem deste fenômeno nos elementos de cobertura analisados, tendo em vista que a corrosão encontra-se já no período de propagação.

Além do capítulo de introdução, o trabalho é desenvolvido ao longo de mais cinco capítulos. No capítulo dois são apresentados os objetivos do trabalho, a questão de pesquisa, as limitações e delimitações da pesquisa e o delineamento do trabalho que foi seguido ao longo do estudo. No terceiro e quarto capítulo são apresentados o material referente a pesquisa bibliográfica para o trabalho.

O capítulo três aborda os temas referentes ao processo corrosivo, como ele ocorre e se desenvolve na estrutura ao longo do tempo, o modo como o concreto protege efetivamente a armadura e os sintomas mais comuns dos processos corrosivos. O capítulo quatro aborda os ensaios que foram realizados para que se chegasse efetivamente ao diagnóstico da estrutura,

sendo estes os ensaios de: caracterização da profundidade de carbonatação, análise química para identificação de íons cloreto presentes na estrutura e para avaliação de potencial de corrosão.

O capítulo cinco apresenta a realização dos ensaios em campo e em laboratório. No capítulo seis são analisados os resultados obtidos e é feito conforme a sugestão da bibliografia pesquisada o diagnóstico relativo à estrutura. Por fim, no capítulo sete são feitas as considerações finais e comentários adicionais sobre o trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: a partir de indícios dos processos corrosivos aos quais as coberturas das passarelas do Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) estão sujeitas, qual o grau de intensidade do processo corrosivo dessas estruturas e qual a origem deste fenômeno?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é a avaliação do grau de intensidade do processo corrosivo, bem como a origem deste fenômeno nas coberturas das passarelas do Campus do Vale, frente à corrosão de armaduras verificadas nas estruturas.

2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que é necessário verificar a intensidade do processo corrosivo e a origem destes fenômenos, visto que no concreto armado a indicação visual de deteriorações acaba revelando a necessidade de intervenção para evitarem-se problemas futuros referentes à diminuição da sua vida útil.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a realização da inspeção detalhada em algumas coberturas de concreto armado localizadas no Campus do Vale, no setor 4.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho que os ensaios foram realizados em uma das passarelas de forma amostral e que os ensaios realizados para obtenção do diagnóstico são:

- a) avaliação do potencial de corrosão;
- b) análise de composição química para verificação de íons cloreto;
- c) caracterização da profundidade carbonatada.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha dos ensaios para definição do diagnóstico;
- c) realização dos ensaios;
- d) diagnóstico e interpretação dos resultados;
- e) considerações finais.

Figura 1 – Representação do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

Depois de definido o tema a ser abordado, deu-se início à etapa de **pesquisa bibliográfica**, que consiste na busca contínua por material que agregue conhecimento sobre o tema e ajude a melhorar o conhecimento técnico acerca das normas referente aos materiais. A partir da pesquisa bibliográfica, foi feita a **escolha dos ensaios para realizar o diagnóstico** do nível de deterioração da estrutura.

Após esta etapa, foram **realizados os ensaios** e feito o **diagnóstico e interpretação dos resultados**, baseados nos dados obtidos em campo e na pesquisa bibliográfica, seguindo os padrões adotados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Na última etapa, foram realizadas as **considerações finais** e, visando o atendimento aos objetivos, foram avaliadas tanto a origem da corrosão e sua intensidade nas coberturas.

3 PROCESSO CORROSIVO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

As armaduras desempenham uma função estrutural de grande importância no concreto armado, pois o aço suporta a maior parte dos esforços de tração, visto que este é um ponto frágil do concreto simples (sem armadura). A corrosão das armaduras se revela um ponto essencial dentro da estrutura, sendo um importante tipo de manifestação patológica e que deve ser melhor bem estudada para poder reduzir este tipo de manifestação em estruturas futuras. Nos itens a seguir, são abordados os conceitos relativos a durabilidade das estruturas e quais as condições necessárias para que ocorra a corrosão. Juntamente ao processo de corrosão, são analisadas as proteções químicas e físicas que existem para preservar a armadura, os sintomas que as estruturas apresentam como indicativos de manifestações patológicas, e por último as formas de promoção da corrosão por carbonatação e por íons cloretos.

3.1 DURABILIDADE EM ELEMENTOS DE CONCRETO

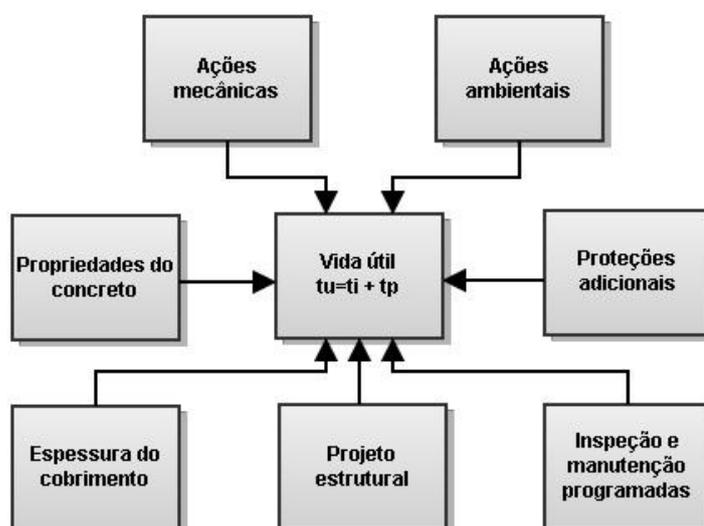
Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), para o dimensionamento de estruturas em concreto armado somente a armadura empregada deve ser considerada para fins de dimensionamento a solicitações de tração. O concreto simples apresenta valores insignificantes de resistência à tração quando submetidos a este tipo de solicitação, desta forma, despreza-se o valor referente à tração do concreto no momento da determinação da resistência.

O dimensionamento incorreto da estrutura aliado à má execução pode ocasionar a deterioração da estrutura, principalmente da armadura. As consequências que derivam das degradações de elementos estruturais são variadas e abrangem desde a durabilidade e vida útil do material até a segurança estrutural. Bertolini (2010, p. 47) afirma que a segurança estrutural é afetada em função da redução da seção resistente dos elementos de suporte, no caso as armaduras, ocasionando assim uma redução do suporte de carga para a qual o elemento foi projetado.

Outro ponto a ser abordado é a questão do cobrimento, que é fornecido pelo concreto e deve respeitar os requisitos mínimos da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 19). O cobrimento tem por finalidade proteger fisicamente a armadura, fornecendo um meio pouco permeável para a entrada de agentes agressivos, ao mesmo tempo em que mantém um meio alcalino, evitando assim o rompimento da camada de passivação do aço (HELENE, 1986, p. 1).

A vida útil e a durabilidade são dois quesitos que costumam andar juntos. Deve ser entendido que a estrutura é considerada como segura e utilizável para os fins projetados, desde que o seu desempenho continue acima de um limite mínimo estabelecido em projeto. Dentre esses aspectos, Souza e Ripper (1998, p. 18-19) salientam aqueles aos quais a estrutura está submetida. Os mais relevantes são a corrosão das armaduras, os diferentes tipos de ambiente com exposição a variações de temperatura e agressividade química, e que são considerados no cálculo da vida útil como apresenta a figura 2.

Figura 2 – Cálculo da vida útil da estrutura



(fonte: BERTOLINI, 2010, p. 162)

3.2 PROCESSO CORROSIVO

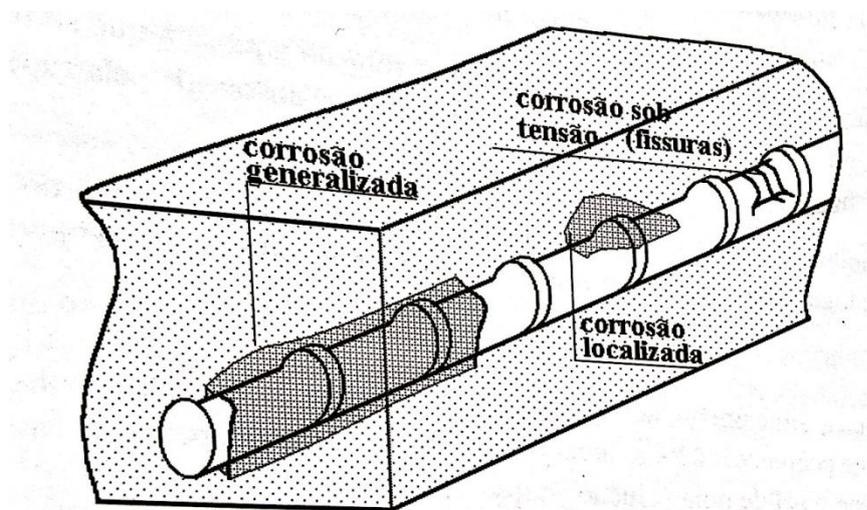
O processo corrosivo tem como princípio a modificação do material (aço, neste caso) após uma reação química ou eletroquímica entre os materiais presentes no concreto armado e o

ambiente. As reações que levam à corrosão ocorrem geralmente em ambientes úmidos, mais especificamente com umidade relativa do ar na faixa de 60%, ou na presença de água, sendo denominados de corrosão úmida ou em meio aquoso (HELENE, 1986, p. 1-2).

3.2.1 Início e desenvolvimento do processo de corrosão

Conforme citado por Souza e Ripper (1998, p. 65-66), existem diversas formas de ocorrer corrosão em armaduras. Cada tipo específico de corrosão depende diretamente do modo como aconteceu o ataque à estrutura. Os casos que ocorrem na maior parte das vezes são corrosão generalizada (uniforme) ou localizada. A figura 3 apresenta os tipos de corrosão que o concreto armado pode ser submetido.

Figura 3 – Identificação dos tipos de corrosão



(fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 66)

Na corrosão generalizada é constatado a ocorrência de uma forma mais gradual e homogênea nas estruturas de concreto armado. Para iniciar o processo corrosivo, é necessário um conjunto de fatores específicos que ocorrem dentro do concreto e juntamente à armadura. São eles: despassivação da armadura, presença de água ou umidade, presença de oxigênio e a existência de uma diferença de potencial (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 66). As figuras 4 e 5 apresentam exemplos de corrosão das armaduras localizadas nas coberturas do Campus do Vale da UFRGS.

Figura 4 – Exemplo de corrosão da armadura na cobertura



(fonte: foto do autor)

Figura 5 – Exemplo de corrosão em uma estrutura de concreto



(fonte: foto do autor)

A corrosão generalizada ou corrosão uniforme ocorre de modo que a velocidade da corrosão seja praticamente igual sobre a superfície da armadura. Neste tipo de corrosão, há uma tendência de desgaste aos poucos do material, reduzindo assim o diâmetro da barra para níveis abaixo de projeto em casos mais avançados, sendo que estes efeitos são considerados pelo

projetista estrutural de modo a aumentar a vida útil da estrutura (BERTOLINI, 2010, p. 48-49).

Através de ensaios realizados considerando os efeitos da propagação da corrosão nas estruturas, Graeff (2007, p. 123-124) demonstra que a partir de um grau de corrosão (perda de massa) maior que 10%, percebem-se alterações no comportamento estrutural do concreto armado. Este grau de corrosão equivaleria a uma perda de seção de aproximadamente 8%. Demonstrando assim a necessidade de um projeto que leve em conta este efeito para a realização do cálculo estrutural.

Helene (1986, p. 3) destaca que casos mais raros de acontecerem são aqueles em que há corrosão localizada. A dificuldade que se encontra nestes casos é que há um rompimento súbito, sem que haja indicação por parte da estrutura de um possível rompimento para permitir as correções necessárias. Nos casos de corrosão localizada, os ânodos são de dimensões menores e são também mais estáveis. Este tipo de corrosão é mais frequente próximo a ambientes marinhos ou em ambientes com presença de cloretos.

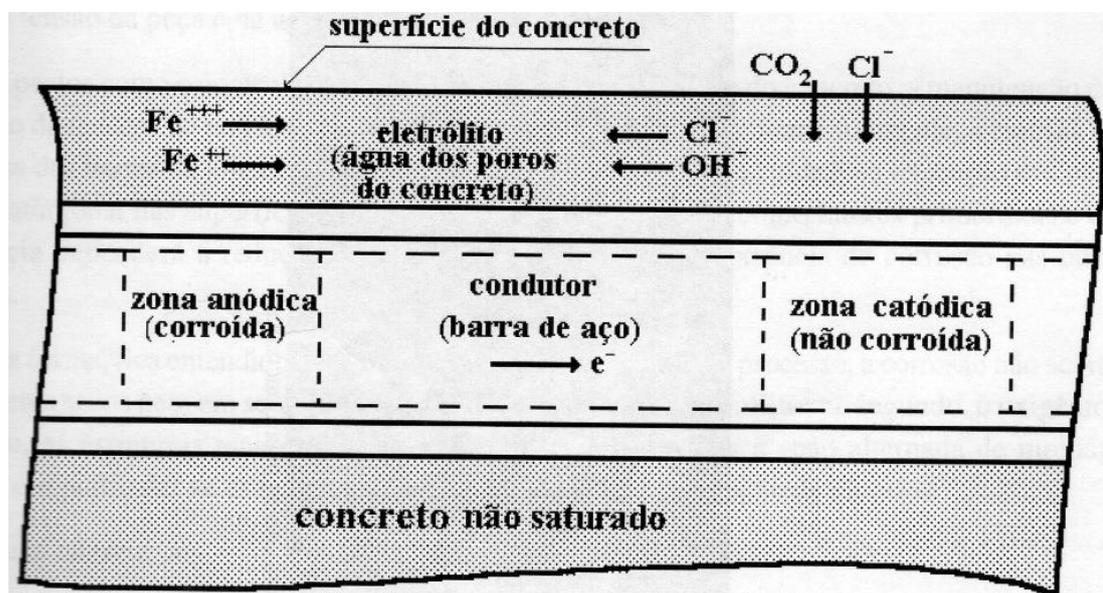
Uma das formas de corrosão localizada é a corrosão por pites ou cavidades. Esta reação se inicia após a despassivação do metal, que ocorre em ambientes onde existem substâncias que são capazes de romper localmente a camada passivada, como compostos com teor de cloretos. O processo se inicia com a fase de iniciação, que é caracterizada pelo rompimento do filme, seguida pela fase de propagação, que é quando os pites são ativados, favorecendo assim a concentração do ataque à estrutura e acelerando o processo corrosivo naquele ponto. Este tipo de ataque realizado pelos cloretos é muito perigoso pois os íons cloretos não são consumidos na reação. Nestes casos, a zona anódica (rompimento local do filme passivo) é pequena enquanto a zona catódica (meio passivo ao redor) é maior e resultará em uma diferença de potencial (BERTOLINI, 2010, p. 68-71).

Antigamente, tinha-se a ideia de que projetando a armadura com uma camada espessa de concreto de baixa permeabilidade, ajudaria a limitar a entrada de ar pelos poros do concreto e seria possível evitar os problemas ligados à corrosão. Após diversas constatações de corrosão, ainda que em armaduras com estas qualificações, começaram a surgir diversos estudos para explicar os mecanismos que levavam ao processo corrosivo (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 168).

O processo de corrosão da armadura para ambos os casos (generalizada e localizada), é definido como sendo um processo eletroquímico, no qual o ferro presente no aço atua como o ânodo da reação, que se oxida. Esta reação que também envolve a presença de água e oxigênio para ocorrer tem como produto a ferrugem, que em alguns casos pode se expandir em até 600% do seu tamanho em projeto. Esta expansão é a principal causa do aparecimento de fissuras, sendo que nestes casos, é necessário a contínua presença de oxigênio e água junto à armadura para que continue a ocorrer o processo corrosivo (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 169).

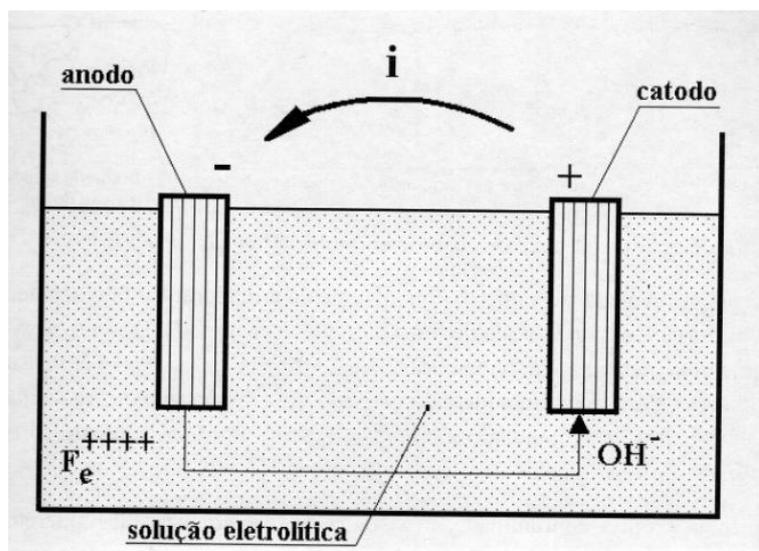
A figura 6 mostra a reação envolvendo o ânodo e o cátodo. Neste caso, o cátodo, que desempenha a função de redutor da reação, é usualmente o oxigênio. Souza e Ripper (1998, p. 67) descrevem este processo corrosivo como um efeito de pilha, em que se fixa uma corrente do ânodo para o cátodo através da água e no sentido inverso, pela diferença de potencial, como demonstrado pela figura 7.

Figura 6 – Regiões anódicas e regiões catódicas



(fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 67)

Figura 7 – Efeito de pilha



(fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 67)

Um fator a ser levado em consideração para explicar o mecanismo de corrosão é o da agressividade ambiental. O clima em que se encontra a estrutura terá grande impacto sobre as suas características, tanto na fase de concepção e execução, como na sua fase de utilização. O ambiente também define a existência de agentes externos, que podem penetrar na estrutura, e as condições de temperatura e umidade (BERTOLINI, 2010, p. 162-163). Além do clima, existe também o microclima que se instala naquela região quando a estrutura é executada, criando condições específicas, que podem se diferenciar em parte das condições externas.

Em qualquer um dos casos de corrosão, se retirado algum dos elementos (água, oxigênio ou diferença de potencial) a reação é interrompida. Para os casos em que não há disponibilidade simultânea de oxigênio e umidade, a corrosão torna-se termodinamicamente impossível ou quando há em excesso também não há corrosão das armaduras. É interessante notar também que as condições de umidade e presença de oxigênio adequado podem atuar nos dois sentidos, protegendo a armadura quando ainda está passivada, e acelerando a corrosão em casos em que já se tenha iniciado o ataque à estrutura (RINCÓN et al., 2006, p. 20, tradução nossa).

No caso mais específico das coberturas de concreto armado, estas estruturas sofrem as piores condições, pois estão sujeitas a ciclos de secagem e molhagem conforme cita Bertolini (2010, p. 162):

- a) em condições de umidade intermediária, os elementos estruturais podem ser submetidos tanto à corrosão das armaduras como à degradação direta do

concreto; em geral, os efeitos da degradação aumentam quando a temperatura sobe e quando cresce a umidade do concreto (só no que concerne a corrosão, esses efeitos voltam a diminuir quando o concreto se aproxima da saturação, graças à difusão reduzida de CO_2 e O_2 através dos poros saturados da água);

- b) as condições em que o concreto sofre ciclos de molhagem e secagem são, em geral, as mais críticas para a corrosão das armaduras, pois permitem, mesmo que em momentos diferentes, a penetração tanta da água (e dos sais eventualmente dissolvidos nela, como os cloretos) como das substâncias em estado gasoso (como o dióxido de carbono e oxigênio).

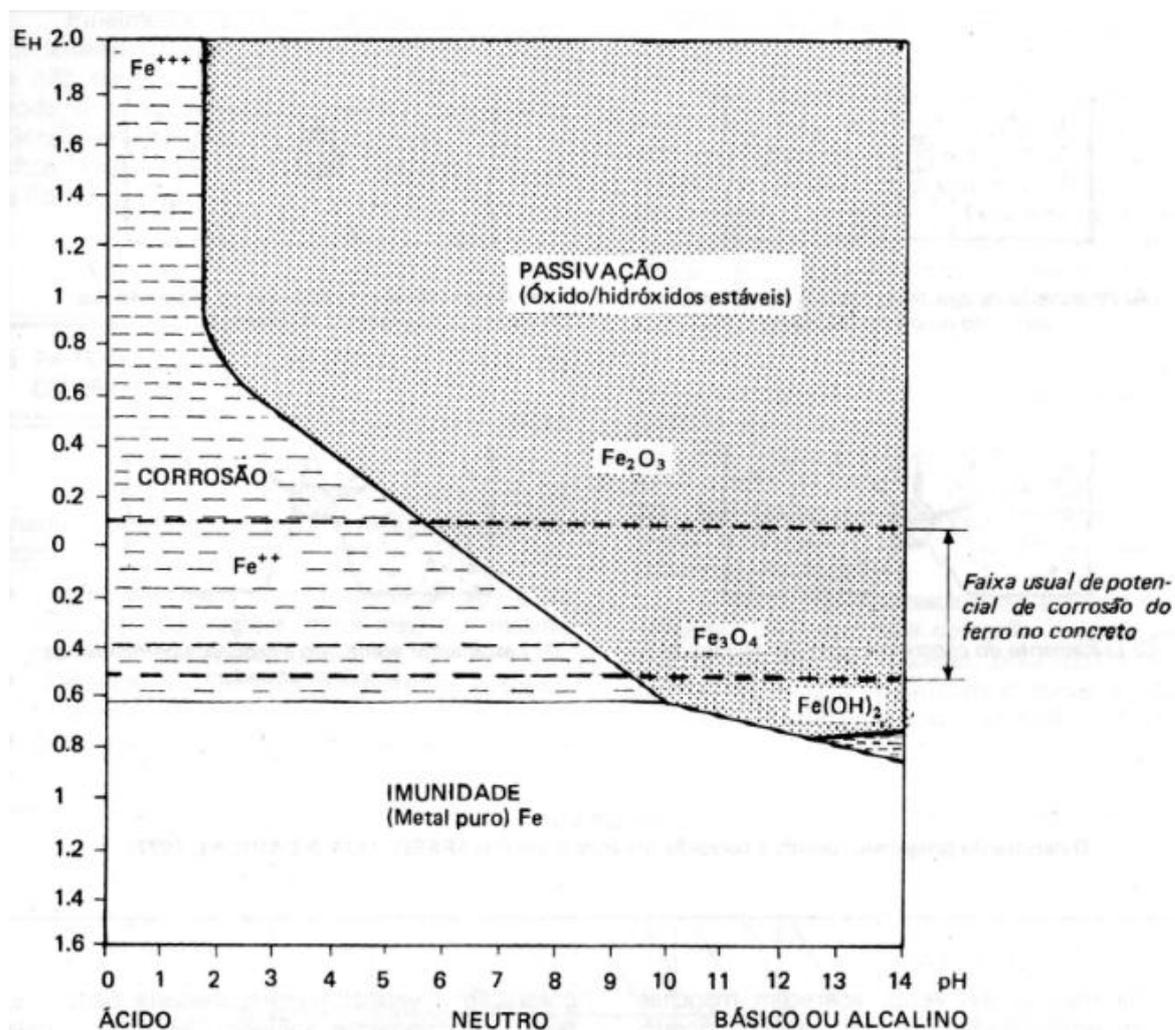
Souza e Ripper (1998, p. 65) indicam que, não necessariamente, a água que dá início às reações de corrosão tenha que ser originada do meio exterior ao concreto. Ela pode ser uma parcela que está em excesso devido à água de amassamento do concreto, e que acaba por penetrar posteriormente nos veios capilares do concreto.

Uma observação a ser feita é que, segundo Helene (1986, p. 3-4), devido aos poros do concreto, podem adentrar na estrutura íons cloretos, íons sulfetos, nitritos e dióxido de carbono, entre outros agentes agressivos, que penetram na estrutura de concreto armado e aceleram o processo de corrosão. Estes agentes reagem diretamente com a película protetora passivada (proteção química) que se forma através da combinação da ferrugem, que fica imediatamente acima da barra, com o hidróxido de cálcio, que é formado a partir das reações de hidratação que são geradas no concreto. Outra proteção que se faz contra a entrada destes agentes agressivos é o revestimento do concreto, que se executado adequadamente, propicia mais um nível de bloqueio à entrada destas substâncias. Ambos os tipos de proteções, química e física, são abordados a seguir.

3.2.2 Proteção química das armaduras

Um dos principais elementos da proteção química contra a corrosão das armaduras é o meio alcalino que existe no concreto, que protege a armadura e possibilita a formação e manutenção da película passivadora do aço. Uma parte relevante dentro da proteção química é o pH do meio em que se encontra a estrutura. Na figura 8 é apresentado o potencial de corrosão do ferro para diferentes faixas de pH. É possível notar que para a faixa usual de potencial de corrosão, os meios com pH menor que nove tendem a iniciar o processo de corrosão.

Figura 8 – Delimitação das faixas de passivação, corrosão e imunidade em função do pH



(fonte: POURBAIX¹, 1961 apud HELENE, 1986, p. 5)

A proteção química fornecida pelo aço metálico é constatada nos produtos de ferro e aço, e se forma como sendo uma fina camada protetora de óxido de ferro. Esta camada é impermeável, formando uma barreira à entrada de agentes agressivos. A camada passivada é considerada estável em meios em que se tem o pH maior ou igual a 11,5 e que tenha ausência de íons cloretos, pois estes rompem a camada passivada localmente (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 169-170).

¹ POURBAIX, M. Curso sobre corrosão eletroquímica. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Industrial, 1961.

3.2.3 Proteção física

Nas estruturas de concreto armado, o concreto é o elemento que fornece a resistência e que da forma à estrutura, além de proteger a armadura e evitar a entrada de água, o oxigênio e agentes corrosivos. Para isto é de suma importância a proteção física, ou seja, o cobrimento. Helene (1986, p. 4, grifo do autor), descreve a seguir como deve ser uma boa proteção física:

Um bom cobrimento das armaduras, com um concreto de alta compacidade, sem **ninhos**, com teor de argamassa adequado e homogêneo, garante, por impermeabilidade, a proteção do aço ao ataque de agentes agressivos externos.

Esses agentes podem estar contidos na atmosfera, em águas residuais, águas do mar, águas industriais, dejetos orgânicos, etc. Não deve, tampouco, conter agentes ou elementos agressivos internos, eventualmente utilizados no seu preparo por absoluto desconhecimento dos responsáveis, sob pena de perder, ou nem mesmo alcançar, essa capacidade física de proteção contra a ação do meio ambiente.

Bertolini (2010, p. 161-162) propõe que o cálculo da vida útil da estrutura seja coincidente com o destacamento do cobrimento nos casos de corrosão por carbonatação, já que nestes casos se tem uma facilidade maior de previsão de ocorrência. Já para os casos em que há corrosão por cloretos, o cálculo é mais complicado, pois a referência é a ativação da corrosão, e esta ativação nem sempre é previsível.

Para que se tenha um controle mais eficaz sobre a corrosão e para poder determinar com mais precisão a vida útil da estrutura, o cobrimento desempenha um fator muito importante, pois ele um dos responsáveis pela impermeabilidade do concreto. Dentre os fatores que podem ser controlados para se obter uma maior resistência à penetração de agentes externos através dos poros são a relação água/cimento, consumo de cimento e a granulometria dos agregados (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 173).

É necessário ressaltar, que a fim de se evitar a corrosão das armaduras se deve prestar atenção aos aspectos do concreto que ajudam no bloqueio à entrada de agentes agressivos e ajudam, portanto, o concreto a ter uma baixa porosidade. A seguir, Bertolini² (2006 apud BERTOLINI, 2010, p. 163, grifo do autor) apresenta alguns aspectos que devem ser levados em consideração nos projetos e durante a fase de execução da obra:

² BERTOLINI, L. **Materiali da Construzione**: struttura, proprietà e tecnologie di produzione. Milão: Città Studi, 2006. v. 1.

- a) **relação água/cimento (a/c):** é o fator-chave para determinar a porosidade capilar da pasta de compostos de cimento e, assim, a resistência à penetração dos agentes agressivos;
- b) **tipo de cimento e adições:** as adições pozolânicas ou de escória de alto-forno podem melhorar claramente a resistência à penetração dos íons agressivos [...]; os cimentos compostos têm, além disso, efeitos benéficos em relação ao ataque por sulfatos e à reação álcali-agregados e são caracterizados por um baixo calor de hidratação;
- c) **cura:** uma cura inadequada impede a hidratação do cimento e leva a uma porosidade capilar elevada, sobretudo no cobrimento;
- d) **teor de cimento:** o aumento do teor de cimento, para uma dada relação **a/c**, permite o emprego de maior quantidade de água na massa e, assim, maior moldabilidade;
- e) **resistência a compressão:** além de ser requerida razões estruturais, está correlacionada às exigências de durabilidade; escolhido o tipo de cimento, as prescrições sobre a máxima relação **a/c** podem até ser expressas em termos de mínima classe de resistência [...];
- f) **adensamento do concreto na obra:** a durabilidade de uma estrutura pode ser garantida somente se o concreto for corretamente misturado, transportado e vibrado; o requisito de uma alta moldabilidade do concreto permite tornar o material menos sensível aos efeitos da qualidade da mão de obra; analogamente, todas as práticas de canteiro de obras que garantam a obtenção de um concreto bem curado e bem adensado são indispensáveis para não tornar vãs todas as prescrições formuladas na fase de projeto [...].

A proteção física dada pelo cobrimento é tanto maior quanta maior for a espessura da camada de cobrimento. De acordo com Bertolini (2010, p. 164, grifo do autor):

O aumento da espessura do cobrimento permite alongar o tempo necessário para a ativação dos fenômenos corrosivos, aumentando a profundidade que a carbonatação ou os cloretos devem atingir para despassivar as armaduras. Quando se projeta uma estrutura de concreto armado, é possível, assim, determinar a espessura que vai garantir um tempo de ativação/iniciação suficientemente longo. À medida que cresce a agressividade ambiental, é possível, em teoria, com um aumento da espessura do cobrimento, manter constante o grau de confiabilidade das estruturas. Na prática, porém, as espessuras não podem superar certos limites por motivos econômicos e técnicos; para elevadas espessuras de cobrimento, aumenta notavelmente o risco de fissuração, por causa da contração higrométrica do concreto ou das cargas de projeto.

É necessário observar que a espessura do cobrimento deve ser garantida em todos os pontos da estrutura. Mesmo uma redução modesta da espessura pode determinar uma redução significativa da vida útil da estrutura. Como a penetração da carbonatação e dos cloretos é, **grosso modo**, proporcional à raiz quadrada do tempo, uma redução da espessura do cobrimento leva a uma redução do tempo de ativação da corrosão muito mais que proporcional. Se, em algumas zonas de uma estrutura, o cobrimento tem a metade do cobrimento nominal, o tempo de ativação reduz-se a cerca de um quarto do previsto. Os controles de canteiro de obras e o emprego de medidas adequadas para garantir o respeito às espessuras do cobrimento durante o lançamento são, portanto, uma importante medida de prevenção.

O tipo de ambiente no qual está inserida a estrutura é fundamental para o cálculo da sua vida útil. Helene (1986, p. 1) destaca que o meio ambiente deve ser levado em consideração na concepção do projeto, visto que a atmosfera e outros agentes presentes em suspensão são os responsáveis pela corrosão em última instância.

Conforme definido por Helene (1986, p. 17), as atmosferas rurais são aquelas que se situam mais afastadas de fontes poluidoras e grandes centros urbanos. Estas atmosferas propiciam menos riscos à estrutura, através de ataques por agentes agressivos e demoram mais tempo até romper a camada passivadora do concreto, que é função do revestimento da armadura. Também são detectados baixos teores de SO_2 , H_2S , entre outros gases, a menos que haja uma fonte natural nas proximidades.

Já as atmosferas urbanas, são consideradas como sendo aquelas situadas ao ar livre dentro dos grandes centros populacionais. São inerentes a este tipo de atmosfera diversos tipos de impurezas tais como: óxidos de enxofre, fuligem ácida, dióxido de carbono, ácido sulfídrico, etc. Conforme mencionado por Helene (1986, p. 17-19), as partículas em suspensão devido à sua natureza, geram um processo cíclico no qual o aumento de condensação gera a deposição da fuligem, que gera um aumento na velocidade da corrosão.

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007) apresenta para cada classe de agressividade ambiental considerada na tabela 1 a sua respectiva espessura mínima de revestimento nominal, que é apresentada na tabela 2. É possível observar-se que quanto maior a agressividade do ambiente (presença de CO_2 e agentes agressivos), maior será o revestimento mínimo necessário.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental (CAA)	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	Rural Submersa	insignificante
II	moderada	Urbana	pequeno
III	forte	Marinha	grande
IV	Muito forte	Industrial	elevado

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 16)

Tabela 2 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental e cobrimento mínimo (mm)			
		I	II	III	IV
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido	Todos	30	35	45	55

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 19)

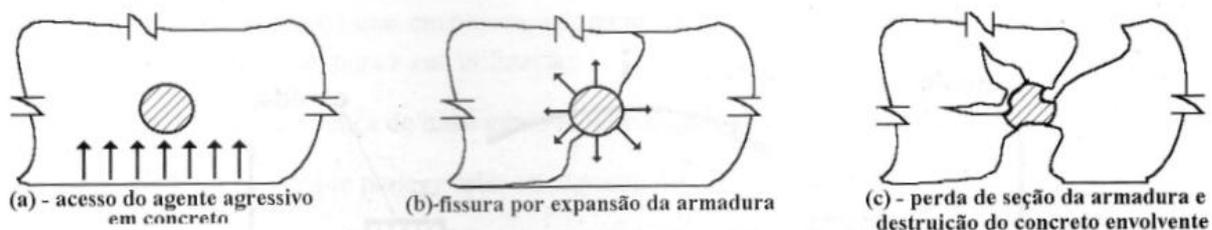
3.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS CAUSADAS PELA CORROSÃO

O processo corrosivo geralmente fornece indícios quanto a sua existência na estrutura, que dificilmente passam despercebidos. Dentre os sintomas mais comuns relativos à patologia das estruturas e que são detalhados nos próximos itens estão: a fissuração dos elementos estruturais e a desagregação do concreto.

3.3.1 Fissuração

Dentre os sintomas existentes, o mais característico é o da fissuração. A fissuração do concreto pode ocorrer em função da expansão da armadura devido aos produtos resultantes da corrosão (ferrugem), que se depositam sobre a armadura, aumentando o seu volume em até seis vezes (BERTOLINI, 2010). As fissuras também podem surgir por outros fatores como: deficiências de projeto, retração e deficiências na execução. Estes fatores contribuem para a abertura das fissuras e acabam acelerando o processo de corrosão, permitindo a entrada mais fácil de agentes agressivos (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 56-57). A figura 9 mostra mais claramente o processo de corrosão e a fissuração como sinal da existência expansão.

Figura 9 – Estágios do processo de corrosão da armadura



(fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 68)

Dentro deste contexto, Souza e Ripper (1998, p. 57) delimitam a seguir a importância de se conhecer a origem da fissuração e sua classificação, para determinar quais os procedimentos a se adotar com relação à fissura:

[...] a caracterização da fissuração como deficiência estrutural dependerá sempre da origem, intensidade e magnitude do quadro de fissuração existente, posto que o concreto, por ser material com baixa resistência a tração, fissurará por natureza, sempre que as tensões trativas, que podem ser instaladas pelos mais diversos motivos, superarem a sua resistência última a tração.

[...] um processo de fissuramento pode, quando anômalo, instalar-se em uma estrutura como consequência da atuação das mais diversas causas, intrínsecas ou extrínsecas, e, para que se consiga identificar com precisão causa(s) e efeito, é necessário desenvolver análises consistentes, que incluam a mais correta determinação da configuração das fissuras, bem como da abertura – e de sua variação ao longo do tempo –, da extensão e da profundidade das mesmas.

[...] ao se analisar uma estrutura de concreto que esteja fissurada, os primeiros passos a serem dados consistem na elaboração do mapeamento das fissuras [...] e em sua classificação, que vem a ser a definição da atividade ou não das mesmas (uma fissura é dita ativa, ou viva, quando a causa responsável por sua geração ainda atua sobre a estrutura, sendo inativa, ou estável, sempre que sua causa se tenha feito sentir durante um certo tempo e, a partir de então, deixado de existir.

Quanto aos sintomas da fissuração e sua localização, Helene (1986, p. 6, grifo do autor) afirma que:

[...] sob más condições **construtivas**, a corrosão iniciar-se-á nos locais mais quentes e mais úmidos e onde o risco de condensação seja maior. O processo é nitidamente visível, pois os produtos da corrosão têm, predominantemente, coloração vermelho-marrom-acastanhada e, sendo relativamente solúveis, **escorrem** pela superfície do concreto, manchando-o.

O risco de corrosão também aumenta nas regiões angulosas, arestas e cantos da estrutura [...]. É sempre aconselhável ter estruturas com cantos e arestas arredondados, assim como aumentar o cobrimento em situações de agressividade acentuada.

As fissuras geradas pelo processo de corrosão são avaliadas de acordo com seu tamanho na superfície do concreto através das normas, sendo consideradas irrelevantes entre 0,1 e 0,3 mm. Nestes casos, a estrutura dependerá mais da agressividade ambiental, cobrimento e porosidade do concreto para iniciar a corrosão (BERTOLINI, 2010, p. 165).

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, p. 72) apresenta a tolerância com relação às dimensões para aberturas de fissuras, de acordo com a classe de agressividade ambiental. Para a classe I e considerando para o concreto estrutural do tipo concreto armado, a abertura máxima é de 0,4 mm. Já para a classe II e classe III, considerando a mesma estrutura, a abertura máxima é de 0,3 mm.

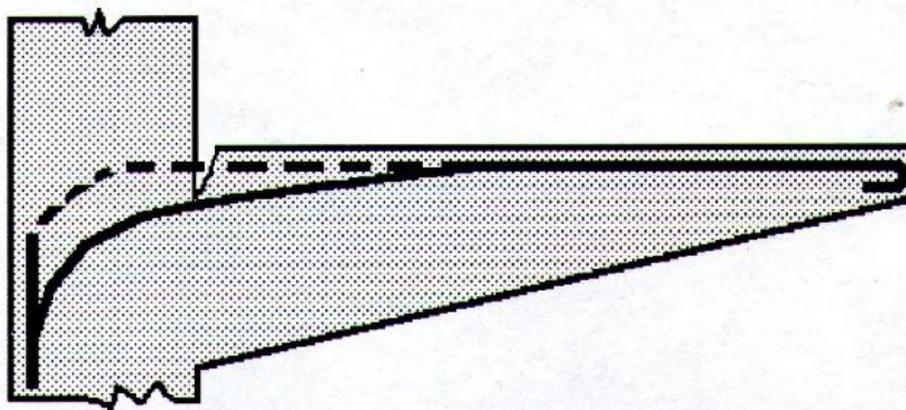
Stanish et al. (1999, p. 917, tradução nossa) salienta que à medida que aumenta o grau de corrosão da estrutura, há uma tendência de aumentar a tensão interna do concreto e conseqüentemente ao aumento do número de fissuras. Este processo leva à redução da capacidade de suporte da estrutura de concreto e que em estágios posteriores podem levar também ao deslocamento do concreto.

Referente à retração do concreto Souza e Ripper (1998, p. 63) afirmam que:

A retração do concreto é um movimento natural da massa que, no entanto, é contrariado pela existência, também natural, de restrições opostas por obstáculos internos (barras de armadura), e externos (vinculação a outra peças estruturas). Se este comportamento, reológico não for considerado, quer em nível de projeto, quer de execução, são grandes as possibilidades do desenvolvimento de um quadro de fissuração [...].

Mesmo supondo que o projeto a princípio não tenha falhas, ainda há pelo menos mais uma etapa no processo de edificação da estrutura, que gera um número elevado de fissuras: a etapa de execução. Segundo Souza e Ripper (1998, p. 64-65), as deficiências causadas por erros na execução devido à falta de cuidado, falta de verificação por parte dos supervisores de detalhes construtivos e posicionamento de armadura, podem levar à fissuração semelhante às de deficiências de projeto. A figura 10 apresenta o exemplo de um erro no posicionamento da armadura que deveria estar seguindo a linha pontilhada, mas que está posicionada mais a frente, levando o concreto a ser tracionado e rompido naquele ponto. Este rompimento acaba facilitando a entrada de agentes agressivos pela fissura, tornando a armadura mais vulnerável e acelerando o processo corrosivo.

Figura 10 – Fissuração devido ao posicionamento incorreto da armadura



(fonte: SOUZA; RIPPER, 1998, p. 64)

3.3.2 Desagregação do concreto

A desagregação e o deslocamento do concreto ocorrem pelo agravamento do quadro fissuratório da estrutura através do processo corrosivo, e é outro sintoma apresentado pela estrutura, indicando que há algum tipo de patologia presente na mesma. A corrosão das armaduras no concreto ocorre pela reação de oxidação do ferro que resulta em produtos expansivos como o óxido de ferro hidratado, que são capazes de fraturar o concreto e expulsar uma parte do cobrimento (SOUZA; RIPPER, 1998, p. 68).

Souza e Ripper (1998, p. 72) descrevem os fatores a se atentar quanto à qualidade do concreto para que se evite a desagregação e o deslocamento prematuro do concreto:

O concreto, quando de boa qualidade, é um material bastante resistente [...], embora também possa vir a sofrer danos quando em presença de alguns tipos de agentes agressores. Já o concreto de má qualidade, ou seja, o concreto permeável, muito poroso, segregado ou confeccionado com materiais de má qualidade ou impuros, é facilmente atacável por uma série de agentes.

Dentro os diversos fatores que desencadeiam alterações no concreto, dois são salientados. São estes: lixiviação por águas puras (figura 11) e corrosão química por reação iônica devido a agentes despassivantes presentes dentro do concreto, como íons de sulfato e de cloro (RINCÓN et al., 2006, p. 28, tradução nossa). Bertolini (2010, p. 137) salienta o processo de erosão pela água na corrosão:

Erosão pela água. As águas puras, quando correm constantemente sobre o concreto, são agressivas, porque tendem a dissolver lentamente os compostos à base de cálcio. Inicialmente, é afastado o hidróxido de cálcio, mas em seguida são atacados também os outros constituintes, com possíveis efeitos negativos sobre a resistência mecânica. Na presença de fissuras ou retomadas de lançamento, a água é filtrada através do concreto e, quando aflora, deixa na superfície depósitos calcários devidos à reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono do ar. A dimensão da erosão pela água depende, em larga medida, da permeabilidade do concreto; os concretos feitos com cimentos pozolânicos ou com escória de alto-forno têm uma resistência maior à erosão pela água.

Sobre a corrosão química por reação iônica e corrosão por expansão, Souza e Ripper (1998, p. 73) afirmam:

A corrosão química por reação iônica ocorre em virtude da reação de substâncias químicas existentes no meio agressivo com componentes do cimento endurecido. Esta reação leva à formação de compostos solúveis, que são carreados pela água em movimento ou que permanecem onde foram formados, mas, nesse último caso, sem poder aglomerante. Os principais íons que reagem com os compostos do cimento são o magnésio, o amônio, o cloro e o nitrato.

Na corrosão por expansão ocorrem reações dos sulfatos com componentes do cimento, resultando em um aumento do volume do concreto que provoca sua expansão e degradação.

Figura 11 – Exemplo de lixiviação na cobertura



(fonte: foto do autor)

É necessário atentar-se para os processos de alteração do concreto, pois estes enfraquecem a sua estrutura deixando-o mais poroso, o que permite a entrada mais fácil dos agentes

agressivos. Sempre que for constatado algum destes processos, ele deve ser interrompido o quanto antes, do contrário corre-se o risco de tornar a recuperação inviável no futuro.

3.4 FATORES PROMOTORES DA CORROSÃO

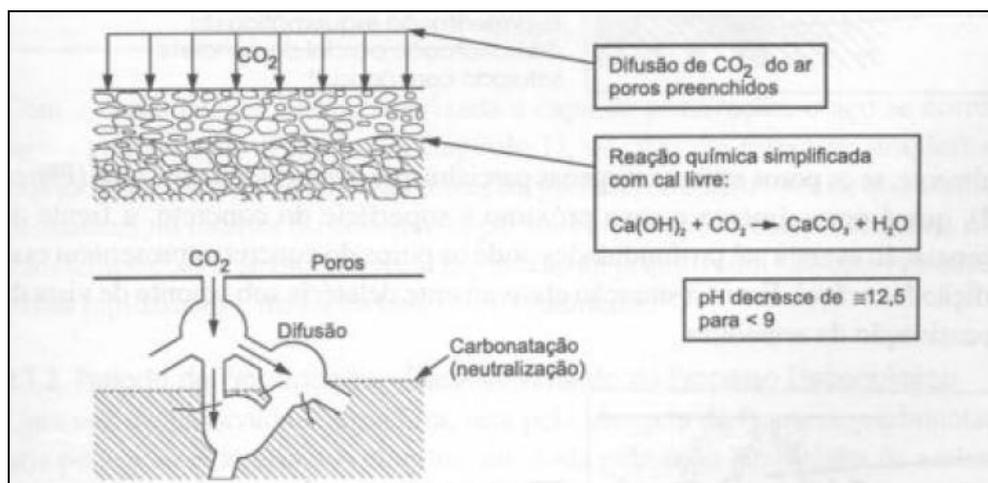
As armaduras dentro do concreto armado são protegidas fisicamente pelo cobrimento e quimicamente pelo pH mais alto (mais básico) que vigora dentro do concreto. Este pH mais básico é devido principalmente a presença do hidróxido de cálcio, sendo que a carbonatação do concreto deteriora esta camada de hidróxido de cálcio. Isto ocorre quando o dióxido de carbono presente na atmosfera entra em reação com os compostos alcalinos no concreto sob a forma de Ca(OH)_2 (BERTOLINI, 2010, p. 139).

Quanto ao pH necessário para que ocorra esta reação, Helene (1986, p. 9) cita que:

O pH de precipitação do CaCO_3 é cerca de 9,4 (à temperatura ambiente), o que altera, substancialmente, as condições de estabilidade química da capa ou película passivadora do aço [...]. Sendo, portanto, um fenômeno ligado à permeabilidade dos gases, deve ser estudado quanto à composição ideal do concreto, de modo a reduzir o risco e a velocidade de carbonatação.

Souza e Ripper (1998, p. 74-75) explicam que devido à alta concentração de CO_2 na atmosfera, o pH tende a ser rebaixado mais rápido e a espessura da camada de cobrimento carbonatada tende a ser maior. Uma observação feita é que se a carbonatação ficasse restrita à espessura inferior do cobrimento, ela até seria benéfica para o concreto, visto que, aumentaria as resistências químicas e mecânicas. Porém devido ao processo de carbonatação e a fissuração decorrente do processo de corrosão promovido pela carbonatação, geralmente se chega ao estágio em que é rompida a camada de passivação da armadura. A figura 12 apresenta a reação simplificada da carbonatação e demonstra como o processo de corrosão atua dentro da estrutura.

Figura 12 – Processo de carbonatação no concreto



(fonte: TORRES, 2006, p. 32)

Bertolini (2010, p. 139-140) refere-se à carbonatação, aos cuidados a se ter em relação ao concreto e suas etapas da seguinte forma:

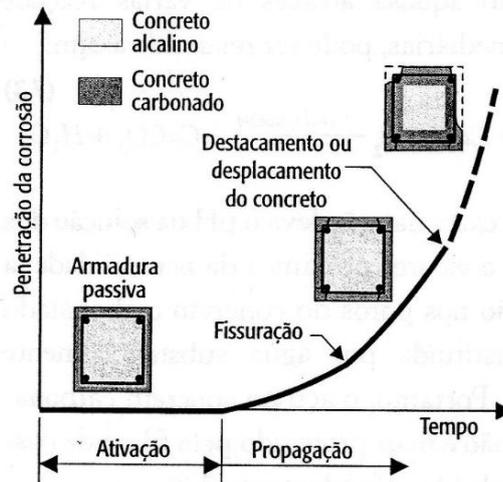
A carbonatação leva o pH da solução dos poros a valores próximos da neutralidade (a solução nos poros do concreto carbonatado é constituída por água substancialmente pura). Portanto, o aço no concreto carbonatado não é mais protegido pelo filme de passividade [...].

Se o concreto está contaminado por cloretos, a carbonatação também causa a liberação, na solução dos poros, dos cloretos que estavam ligados à matriz do cimento.

[...] Em uma primeira fase, a armadura é passiva e não se corrói. A carbonatação, porém, a partir da superfície do concreto, penetra no cobrimento. A corrosão inicia-se quando a frente de carbonatação chega à superfície da armadura. A ativação da corrosão, mesmo que, por si mesma, não influa na funcionalidade ou na estabilidade do elemento estrutural, é um momento crítico na vida da estrutura. Com efeito, o aço despassivado torna-se suscetível à corrosão, com uma velocidade que depende das condições de exposição ambiental. Com o tempo, os produtos de corrosão poderão causar a fissuração e o destacamento do cobrimento, comprometendo assim o desempenho da estrutura. Os produtos de corrosão, com efeito, em função dos óxidos que se formam, ocupam um volume de duas a seis vezes ao do ferro do qual proveem. À medida que ocorrem estes fenômenos, a dimensão da degradação pode atingir condições capazes de comprometer a estabilidade da estrutura.

A figura 13 apresenta a evolução da corrosão por carbonatação descrita por Bertolini (2010, p. 140), onde é possível notar a aceleração da propagação da corrosão a partir do início dos processos fissuratórios, culminando com a perda de parte do cobrimento do concreto.

Figura 13 – Evolução da carbonatação no concreto

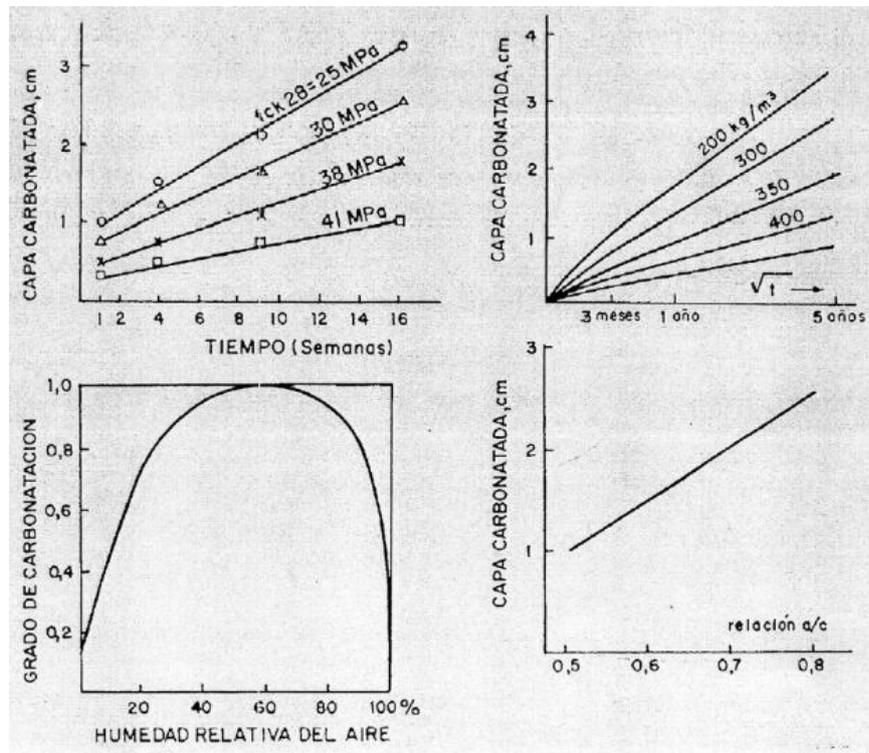


(fonte: BERTOLINI, 2010, p. 140)

Um ponto que também é relevante, segundo Rincón et al. (2006, p. 42-43, tradução nossa), é a velocidade de avanço da frente de carbonatação. Este dado é importante, pois define quanto tempo leva para a camada passivadora perder seu efeito e começar a afetar a armadura. A velocidade é definida em função de três principais fatores: a umidade presente no concreto, a relação a/c e a quantidade de matéria alcalina (óxidos de cálcio, sódio e potássio).

Na figura 14 é apresentada como varia a velocidade de carbonatação do concreto em função da umidade, da relação a/c e da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto. Na mesma figura é possível notar a diferença entre o avanço da carbonatação em ambientes secos e úmidos. Nos ambientes secos os poros do concreto estão secos, limitando as reações do CO_2 , enquanto que quando os poros estão completamente saturados, a penetração é lenta, pois a solubilidade do CO_2 em água é muito baixa (RINCÓN et al., 2006, p. 42-43, tradução nossa).

Figura 14 – Relações entre espessura carbonatada e parâmetros do concreto e do ambiente



(fonte: RINCÓN et al., 2006 p. 43)

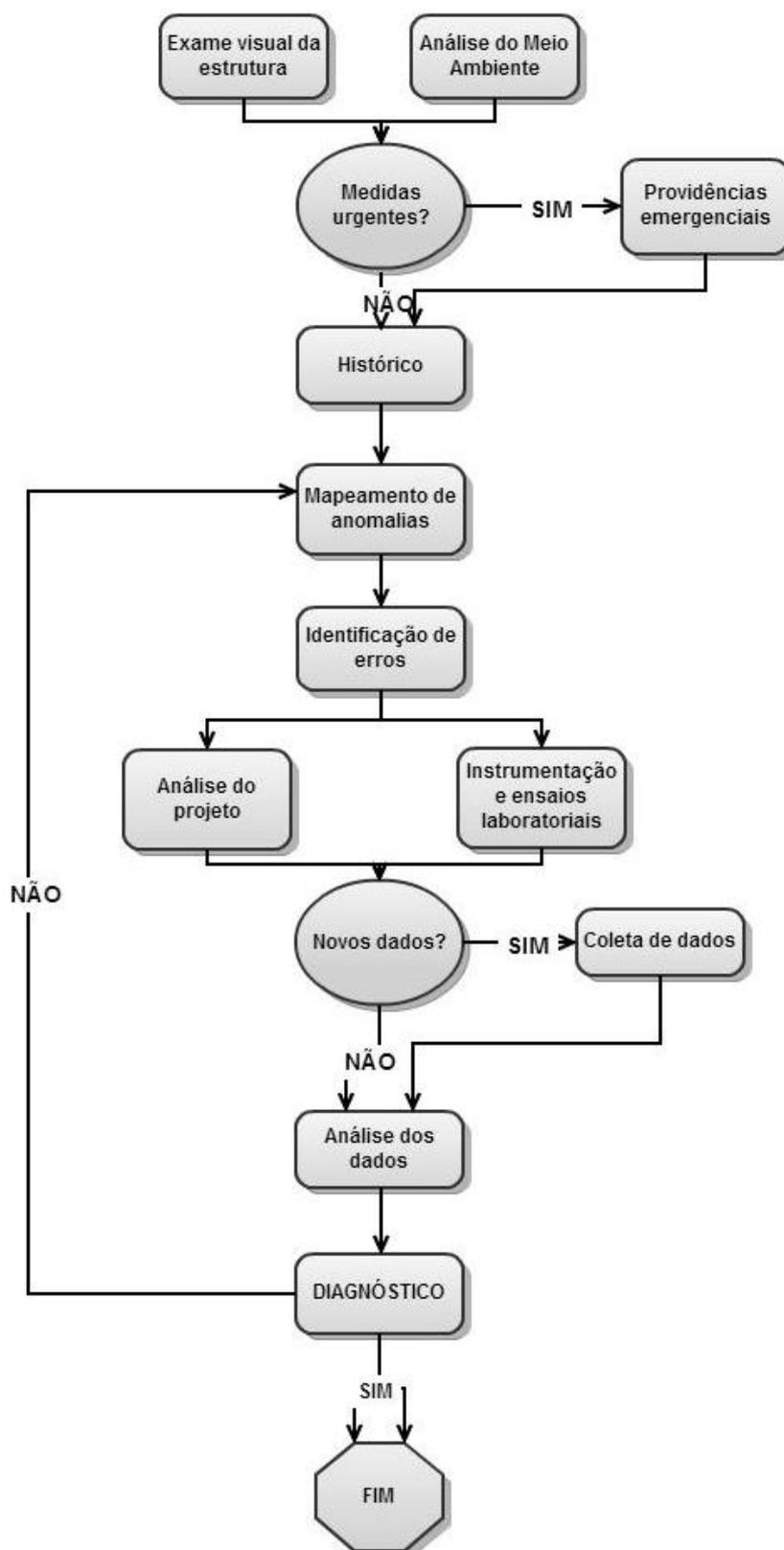
4 INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

Para que se tenha a realização de um diagnóstico adequado relativo à corrosão das armaduras nas coberturas, é necessário que se faça uma inspeção para verificar o estado atual da estrutura. De acordo com Bertolini (2010, p. 284), esta inspeção tem características diferentes em função do tipo de diagnóstico que se deseja obter. A inspeção é necessária para os casos em que se deseja verificar a estabilidade e segurança da estrutura, estado de conservação, previsão da vida residual e realizar projetos de intervenção e restauração.

A partir de uma inspeção visual realizada em momento precedente, e que evidenciou que a maior problemática encontrada na estrutura de concreto armado das passarelas do Campus do Vale é a corrosão, se está procedendo a um aprofundamento da inspeção através da realização de ensaios que comprovem a instauração do processo corrosivo. É citado em Rincón et al. (2006, p. 70, tradução nossa) que de acordo com o tipo de estrutura e a quantidade de informações que se pretende extrair dela é possível separar a fase de inspeção nas duas partes a seguir: inspeção preliminar (já realizada precedentemente) e inspeção detalhada. Para o detalhamento previsto neste estudo, foram selecionados quatro ensaios para realizar o diagnóstico, sendo que a área de aplicação dos ensaios foi definida a partir da inspeção preliminar e seguiu um modelo semelhante ao da figura 15.

Este trabalho se insere no contexto da figura 15 logo após o mapeamento de anomalias e identificação dos erros. Dando assim sequência ao trabalho desenvolvido com o objetivo de se obter um diagnóstico mais preciso da estrutura.

Figura 15 – Modelo para realização do diagnóstico



(fonte: adaptado de SOUZA; RIPPER, 1998, p. 80)

4.1 INSPEÇÃO PRELIMINAR

É necessário realizar uma análise prévia da estrutura antes de começar os ensaios. Esta análise é baseada em informações coletadas sobre a estrutura e durante a inspeção visual. As informações fornecidas quanto à construção da estrutura como a época da construção e meios construtivos aliados a inspeção visual ajudam a reduzir os possíveis fatores que tenham ocasionado a degradação da estrutura, diminuindo assim o número de ensaios. É importante salientar que na maior parte dos casos é difícil encontrar informações confiáveis sobre os materiais utilizados na construção ou os métodos construtivos (BERTOLINI, 2010, p. 285). Nestes casos a inspeção visual é a principal ferramenta a ser utilizada na inspeção preliminar.

A inspeção preliminar deve permitir ter uma visão geral da estrutura e em alguns casos se fazer um pré-diagnóstico, assim como também tem o papel de servir como base para uma investigação mais aprofundada. Nesta inspeção devem ser avaliadas as características da estrutura a fim de determinar se o problema se apresenta de modo igualmente distribuído pela estrutura ou se existem fatores pontuais agindo na mesma. Nos casos de fatores pontuais, estes devem ser registrados devidamente para realizar-se naquele ponto ensaios mais específicos. Estes casos incluem: falta de recobrimento, fissuras, armaduras expostas e degradação do concreto (RINCÓN et al., 2006, p. 74, tradução nossa).

Bertolini (2010, p. 285) ressalta a importância da inspeção visual no que diz respeito à quantidade de informações fornecidas para obter-se um bom diagnóstico e afirma que a inspeção visual já fornece informações para se realizar pelo menos a especificação do fenômeno pela sua manifestação exterior. Também são salientadas algumas limitações, como a impossibilidade de verificar a ocorrência de defeitos internos no concreto e também a de não ser possível saber a composição dos materiais utilizados.

Durante a execução da inspeção visual devem ser anotados para cada manifestação patológica: o tipo de manifestação patológica, frequência, extensão, posição e a existência de possíveis causas para estas manifestações (locais perto de ambiente salino, locais muito úmidos ou sem exposição solar). A partir destas anotações já é possível especificar as possíveis causas da degradação da estrutura e também já ter uma noção melhor para formular uma plano de inspeção detalhado. É necessário neste ponto definir os ensaios a serem adotados para confirmar ou refutar as hipóteses feitas, já especificando em que pontos os ensaios devem ser aplicados. É recomendado que no plano de inspeção detalhada sejam

escolhidos pontos em que aparecem claramente os sintomas das manifestações patológicas e também escolher alguns pontos que aparentemente não estão degradados para se ter um comparativo eficiente (BERTOLINI, 2010, p. 285-286)

Durante a inspeção das estruturas, Bertolini (2010, p. 286) acrescenta que:

A observação visual das estruturas de concreto armado permite visualizar erros construtivos que podem favorecer a ativação da corrosão, como espessuras variáveis de cobrimento, armaduras não adequadamente recobertas pelo concreto por causa da insuficiente trabalhabilidade do concreto no estado fresco, da presença de ninhos de concretagem, da perda de argamassa devida à má estanqueidade das formas, das variações cromáticas da superfície [...].

As fissuras são alguns dos pontos que devem ser cuidados com maior atenção na inspeção preliminar, pois geralmente indicam a ocorrência da degradação da estrutura. As fissuras podem ter diversas origens e podem indicar problemas na estrutura tanto de âmbito externo quanto interno, porém, é difícil determinar com precisão a origem da fissura sem a realização de uma inspeção detalhada.

4.2 PLANO DE INSPEÇÃO DETALHADA

O plano de inspeção detalhada deve ser elaborado cuidadosamente e deve conter os ensaios a serem utilizados, os materiais e os equipamentos necessários para suas execuções. Devem já estar definidas também as áreas nas quais serão realizados os ensaios. Na figura 16 são apresentados alguns exemplos de ensaios que são recomendados para realização durante a inspeção detalhada.

Figura 16 – Ensaios de corrosão abordados



(fonte: elaborado pelo autor)

Geralmente após a inspeção preliminar verifica-se que alguns sintomas podem se repetir diversas vezes e em pontos separados nas estruturas analisadas, tais como manchas de umidade, lascamento do concreto, armadura exposta, falta de cobrimento e fissuração. Para estes casos a bibliografia consultada indica que se verifique quais ensaios poderiam confirmar ou refutar as possíveis causas de deterioração da estrutura. Na tabela 3 são apresentados os ensaios indicados juntamente com suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3 – Tipos de ensaios e suas vantagens e limitações

ENSAIO	Capacidade	Aplicação	Vantagens	Limitações
Potencial de Corrosão	Qualitativa	Qualquer estrutura	Permite pré-selecionar áreas com potencialidade corrosiva. Medida rápida.	Interpretação complexa dos resultados
Definição da Profundidade de Carbonatação	Quantitativa	Estruturas com baixa qualidade do concreto	Prova simples que permite identificar facilmente este fenômeno e o tempo para alcançar a armadura	Ensaio destrutivo
Análise do Perfil de Cloreto	Quantitativa/ Qualitativa	Qualquer estrutura	Permite determinar a qualidade do concreto e o tempo para que se apresente a corrosão do reforço	Ensaio destrutivo/ Interpretação complexa/Apoio estatístico

(fonte: adaptado de RINCÓN et al., 2006, p. 82)

4.2.1 Ensaios para a caracterização da profundidade de carbonatação

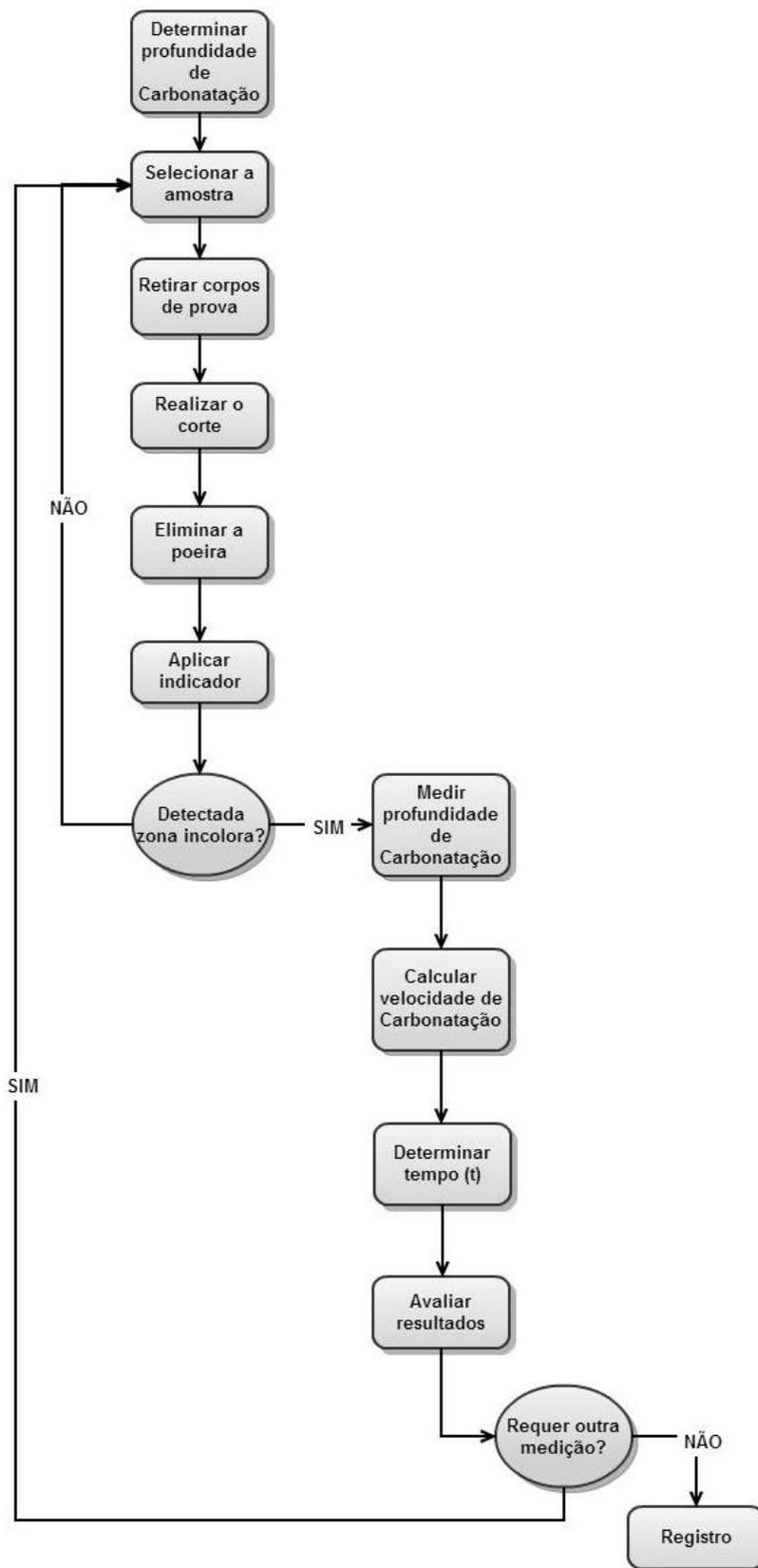
O ensaio para medir a espessura carbonatada tem como objetivo verificar na estrutura até que profundidade, ou até que ponto o cobrimento do concreto está comprometido em termos de pH. Este é um dos ensaios mais comuns e que demonstra resultados rápidos e bastante eficazes.

Este ensaio juntamente com o ensaio de contaminação por cloretos são os dois principais no que diz respeito às causas da corrosão da armadura no concreto. E ambas as análises devem ser feitas visto que a diferença de um tratamento para o outro são bastante relevantes (BROOMFIELD, 2011, p. 636, tradução nossa).

Como cita a designação CPC-18 (REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, 1988, p. 453, tradução nossa), o ensaio é realizado para determinar o efeito da penetração do CO₂, que reduz as medições do pH para valores menores que nove no concreto. Nesta reação, os álcalis presentes no concreto reagem com o CO₂ do ambiente, formando o carbonato de cálcio e diminuindo assim o pH do concreto. Para a realização do ensaio são necessários os seguintes equipamentos: equipamentos de medição, ferramentas para remoção do concreto, material para limpeza da superfície do concreto e uma solução de 1% de fenolftaleína em 70% de álcool etílico para posterior aplicação na superfície do concreto. Na figura 17 é descrito o procedimento a ser adotado para a determinação da espessura carbonatada, sendo este procedimento descrito a seguir de forma mais detalhada.

Bertolini (2010, p. 295) explica que o ensaio é realizado através da aplicação na superfície da camada de concreto de uma solução hidroalcoólica de fenolftaleína. A parte do concreto que está carbonatada fica com a mesma cor, enquanto que a parte que não está carbonatada (ainda fornece ambiente alcalino) assume uma coloração rosada.

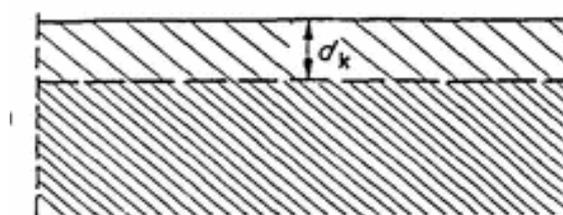
Figura 17 – Procedimentos a se seguir para determinação da espessura carbonatada



(fonte: adaptado de RINCÓN et al.,2006, p. 102)

Deve ser observado que o ensaio deve ser feito em uma superfície sem cortes e deve estar previamente seca e limpa (não pode haver resquícios de pó ou outras substâncias). A medida da espessura do concreto carbonatado é feita considerando a superfície externa do concreto até a margem da região alcalina, onde a cor do concreto começa a ser violeta. É indicado que seja aplicada a solução de fenolftaleína e feita a medição logo após a remoção do concreto (HELENE, 1986, p. 10) para garantir que a película superficial não irá carbonatar. Para superfícies regulares, que demonstram pouca variação da espessura carbonatada, a designação CPC-18 (REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, 1988, tradução nossa) indica que se faça a medição conforme a figura 18.

Figura 18 – Exemplo da medição da espessura carbonatada



(fonte: REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES
ET EXPERTS DES MATERIAUX, 1988, p. 454)

A análise e coleta dos pontos ocorrem em função do pH em que se encontram as diversas partes da estrutura analisada. Este pH está diretamente relacionado com a solução ácido-base selecionada, a de fenolftaleína neste caso, que também é a mais utilizada (RINCÓN et al., 2006, p. 103, tradução nossa). A fenolftaleína possui um ponto de mudança de cor que fica entre o pH de 8,2 e 9,8, variando a sua coloração de incolor até violeta como demonstrado pela figura 19.

Figura 19 – Variação da coloração da fenolftaleína de acordo com a variação do pH

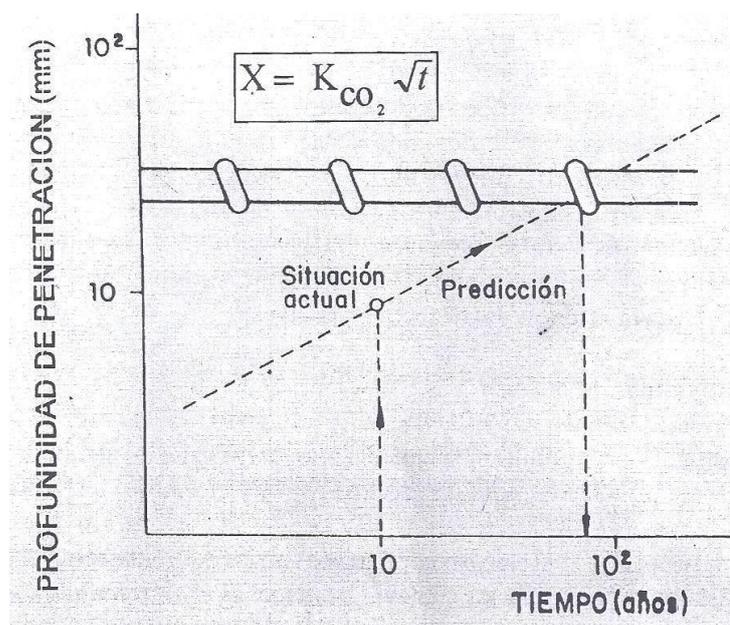
FENOLFTALEÍNA	PH	
	14,0	
	13,0	Alcalinidade Caústica ou Hidróxida (OH)
	12,0	Alcalinidade Carbonato (CO ₃) Nada de Bicarbonato (HCO ₃) Nada de Dióxido de Carbono (CO ₂)
	11,0	
	10,0	
	9,0	Carbonato (CO ₃) e Alcalinidade Bicarbonato (HCO ₃) Nada de Dióxido de Carbono (livre CO ₂) e nada de Alcalinidade Cáustica (OH)
	8,0	
	7,0	
	6,0	Alcalinidade Bicarbonato (HCO ₃) e Dióxido de Carbono Livre (CO ₂), nada de alcalinidade Carbonato (CO ₃)
	5,0	
	4,0	
	3,0	Acidos Minerais (H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃)
	2,0	
1,0		
0,0		

(fonte: adaptado de RINCÓN et al., 2006, p. 104)

Com estes registros realizados ao longo de vários pontos da estrutura, é possível estimar a penetração da carbonatação ao longo da estrutura através de um processo de amostragem. Broomfield (2011, p. 636, tradução nossa) explica que este processo de extrapolação pela amostragem é possível e pode também ser calculado se houve a ativação da corrosão da armadura, através do cálculo da média e do desvio padrão da profundidade carbonatada. Para isto é preciso calcular a taxa de carbonatação a partir do tempo de exposição da estrutura e dos ensaios em laboratório, para então se fazer a extrapolação.

Rincón et al. (2006, p. 105, tradução nossa) indicam que a partir do cálculo da velocidade de carbonatação, é possível estimar para outros pontos (sabendo-se o cobrimento da armadura) o tempo que levará para que a estrutura alcance os seus requisitos mínimos de desempenho e precise ser restaurada. A representação da extrapolação se dá pela figura 20, sendo que é feita uma ressalva quanto às estruturas com menos de três anos de existência, pois estas devem ser analisadas a cada seis meses para se ter maior certeza quanto aos dados.

Figura 20 – Cálculo da velocidade de carbonatação e estimação da vida útil



(fonte: RINCÓN et al., 2006, p. 105)

4.2.2 Ensaio químicos para identificação de íons cloreto

A determinação do nível de íons cloreto no concreto é importante visto que ele não é consumido ao longo das reações que ocorrem dentro do concreto, e consegue romper a camada passiva do concreto fazendo com que a reação seja de forma rápida e localizada. Além disso, não há indicação de redução do pH da estrutura. O íon cloreto pode já estar inserido dentro do concreto através da sua composição (agregados graúdos e miúdos) ou pode entrar pelos poros da superfície do concreto vindo do ambiente (BROOMFIELD, 2011, p. 637, tradução nossa).

A análise química do concreto é uma dentre as muitas análises que podem ser realizadas para se determinar o estado de conservação da estrutura. Existem dois tipos de análise química e que são abordados nos pontos a seguir: os qualitativos, que indicam a presença de determinado elemento e os quantitativos, que indicam a relação percentual em que se encontra o elemento referente à massa de concreto (BERTOLINI, 2010, p. 257).

4.2.2.1 Ensaio colorimétrico para determinação de íons cloreto

O ensaio colorimétrico é um ensaio qualitativo, e segue a descrição do ensaio feito por Collepari et al.³ (1970 apud STANISH et al., 2000, p. 12-13, tradução nossa), no qual foi utilizada uma solução de nitrato de prata para verificar a existência de íons cloreto livres no concreto. O ensaio consiste na remoção de uma parte do concreto e aplicação logo em seguida da solução de nitrato de prata, iniciando a reação. Para os casos em que há presença de íons cloreto, estes se unem à prata formando o cloreto de prata, que resulta em um componente de cor esbranquiçada. Na ausência de íons cloreto, a prata reage com o hidróxido de cálcio e forma um composto de cor marrom-escura.

Trabalhos desenvolvidos por Otsuki et al.⁴ (1992 apud STANISH et al., 2000, p. 13, tradução nossa) indicam que a solução mais adequada a ser usada é uma solução de nitrato de prata em uma concentração aquosa de 0,1 mol/l (17 g/l). Também foi verificado que o ponto em que ocorre a mudança de coloração da solução de nitrato de prata fica em aproximadamente 0,019% do peso de concreto.

4.2.2.2 Ensaio de análise química de íons cloreto

Em alguns casos é possível na análise química a determinação quantitativa de um elemento específico. Neste caso são coletadas as amostras a partir dos pontos já definidos na inspeção preliminar e são analisados os teores de presença de cloretos, que é um dos elementos mais importantes no diagnóstico da corrosão (BERTOLINI, 2010, p. 258-259).

Segundo Rincón et al. (2006, p. 86-87, tradução nossa), para a análise química do concreto devem ser retirados os testemunhos da estrutura de preferência no local que mais está condicionado ao ensaio. Os testemunhos geralmente são extraídos para a análise química de cloretos são na forma do concreto em pó, através do uso de uma furadeira o que facilita o recolhimento e identificação da profundidade da amostra em pó, ou também podem ser retirados testemunhos diretamente do concreto. Antes de começar a extração do material, é preciso ter cuidado para não se romper a estrutura onde já existem pedaços de material solto

³ COLLEPARDI, M.; MARCIALIS, A.; TURRIZUANI, R. Kinetics of Penetration of Chloride Ions into the Concrete. **II Cimento**, [S. l.], n. 4, p. 157-164, 1970.

⁴ OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, USA, v. 89, n. 6, p. 587-592, 1992

ou onde possa ter sido feito algum tipo de reparo e que demonstre que o material coletado não corresponde ao local. Também já devem estar separados os recipientes nos quais serão guardados os materiais coletados, sendo que os recipientes devem estar adequadamente identificados e conservados.

Para se realizar a análise química do concreto, existem dois tipos de métodos principais: os tradicionais e os instrumentais. Os métodos tradicionais são aqueles realizados em laboratório utilizando as técnicas mais comuns como a determinação por via úmida pelo método volumétrico ou gravimétrico. Um exemplo é a análise volumétrica por titulação utilizando o nitrato de prata para se determinar a concentração dos íons cloreto. Já os métodos instrumentais requerem tecnologias e procedimentos mais avançados que a titulação, porém são mais precisos e de execução mais rápida. Dentre estes métodos destacam-se a espectrofotometria, as análises potenciométricas, polarográficas e as cromatográficas (BERTOLINI, 2010, p. 258-261).

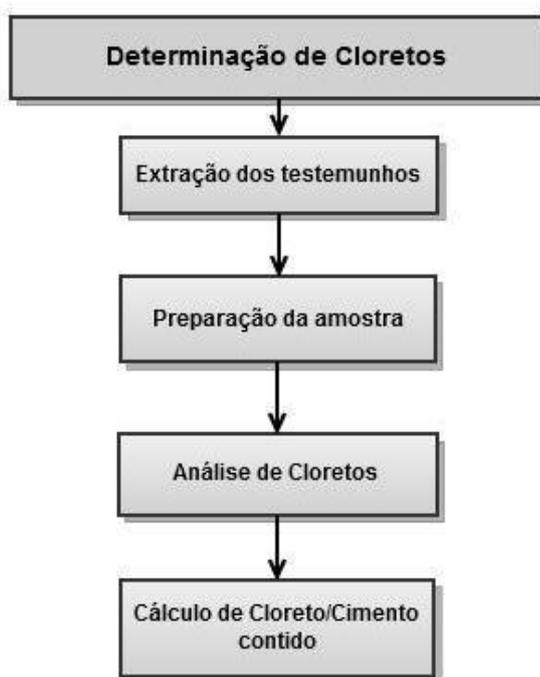
O método que será utilizado neste trabalho para a análise química é o de análise por cromatografia iônica. Para a preparação da amostra da solução que será encaminhada ao cromatógrafo será utilizada a Norma NBR 9917 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), que indica a extração do concreto a partir da estrutura e posterior preparo da amostra para análise. No preparo da amostra, deverá passar pela peneira de 2,36 mm de abertura de malha pelo menos 20 g da amostra. A amostra é então pesada e separada em quantidades de aproximadamente 10 g e misturada com 100 ml de água destilada a 80 ± 5 °C dentro de um frasco de Erlenmeyer de 250 mL e agitado por dez minutos. Após isto a solução é filtrada através de um filtro médio e recolhida em um balão volumétrico de volume conhecido, deve-se então esperar a solução esfriar até a temperatura ambiente e completar o balão volumétrico.

A solução é então novamente diluída e encaminhada para a análise no cromatógrafo iônico. De acordo com a descrição de Fernandes (2008, p. 58), a cromatografia iônica consiste na utilização de resinas de troca iônica em íons de mesmo sinal entre uma solução e um corpo sólido muito insolúvel. Quem realiza esta troca iônica é a resina, que deve permitir a difusão dos íons através da estrutura para poder se realizar a análise. A condutância elétrica, que é uma propriedade que pertence às espécies iônicas em solução é a responsável pela determinação quantitativa dos íons (neste caso dos íons cloretos). O resultado quantitativo é

calculado então por um software que analisa os picos dos íons após passar pelo cromatógrafo. São apresentadas de forma resumida as fases para a determinação dos cloretos presente nas amostras de concreto na figura 21.

É importante ressaltar que por si só a presença de cloretos não ocasiona a corrosão das armaduras. O ponto de virada da concentração de cloretos é em torno de 0,05% da massa de concreto, mas este ponto é aproximado em função de várias características que afetam o concreto tais como: pH, agregados que contem cloretos (mas que alguns casos não são liberados, portanto não afetam o cálculo da corrosão), umidades relativas muito altas ou muito baixas acabam inibindo a ação dos cloretos por falta de oxigênio e água respectivamente (BROOMFIELD, 2011, p. 637, tradução nossa).

Figura 21 – Determinação de cloretos



(fonte: adaptado de RINCÓN et al., 2006, p. 110)

4.2.3 Ensaio para avaliação do potencial de corrosão

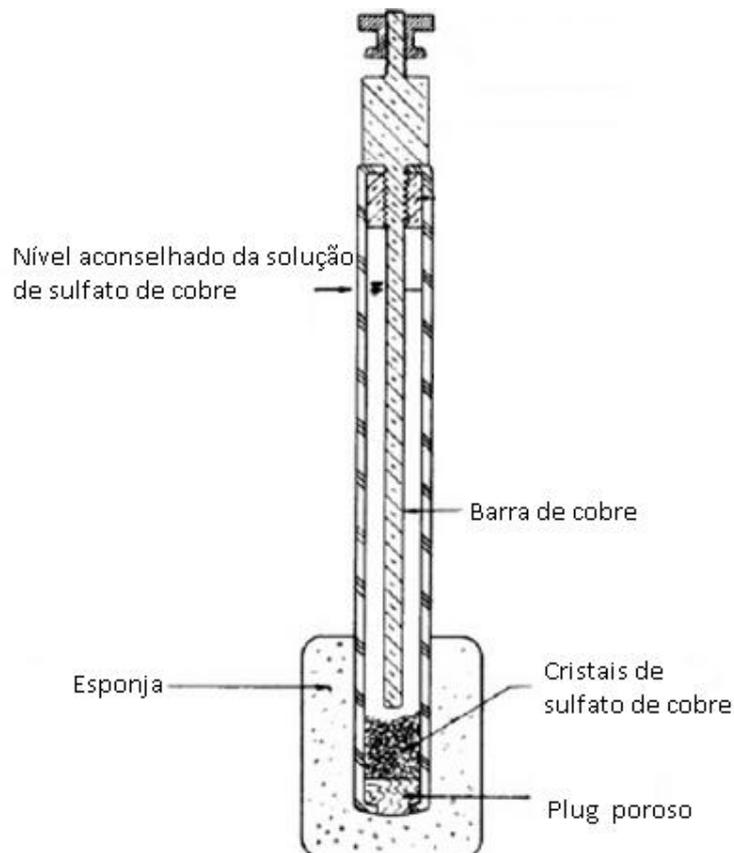
A medida do potencial de corrosão é um dos métodos eletroquímicos disponíveis para auxiliar na medição da corrosão da armadura. A medida é realizada usando-se um eletrodo de

referência para medir a diferença de potencial entre o eletrodo e o metal presente na estrutura (BERTOLINI, 2010, p. 275-276).

A medição pode ser feita tanto em laboratório quanto em campo, sendo que, quando a medição é realizada em campo, o eletrodo de referência utilizado é o eletrodo de cobre. Este eletrodo é constituído por uma barra de cobre imerso em uma solução saturada de sulfato de cobre conforme representado pela figura 22.

Broomfield (2011, p. 638, tradução nossa) destaca o bom resultado atingido através da medição do potencial de corrosão referente ao risco de corrosão, mas alerta sobre o uso e os cuidados que se deve ter com o eletrodo de referência, mais especificamente com o eletrodo de cobre. É preciso ter cuidado, pois a célula corre o risco de contaminação e vazamento, devendo ser feita uma manutenção periódica do equipamento.

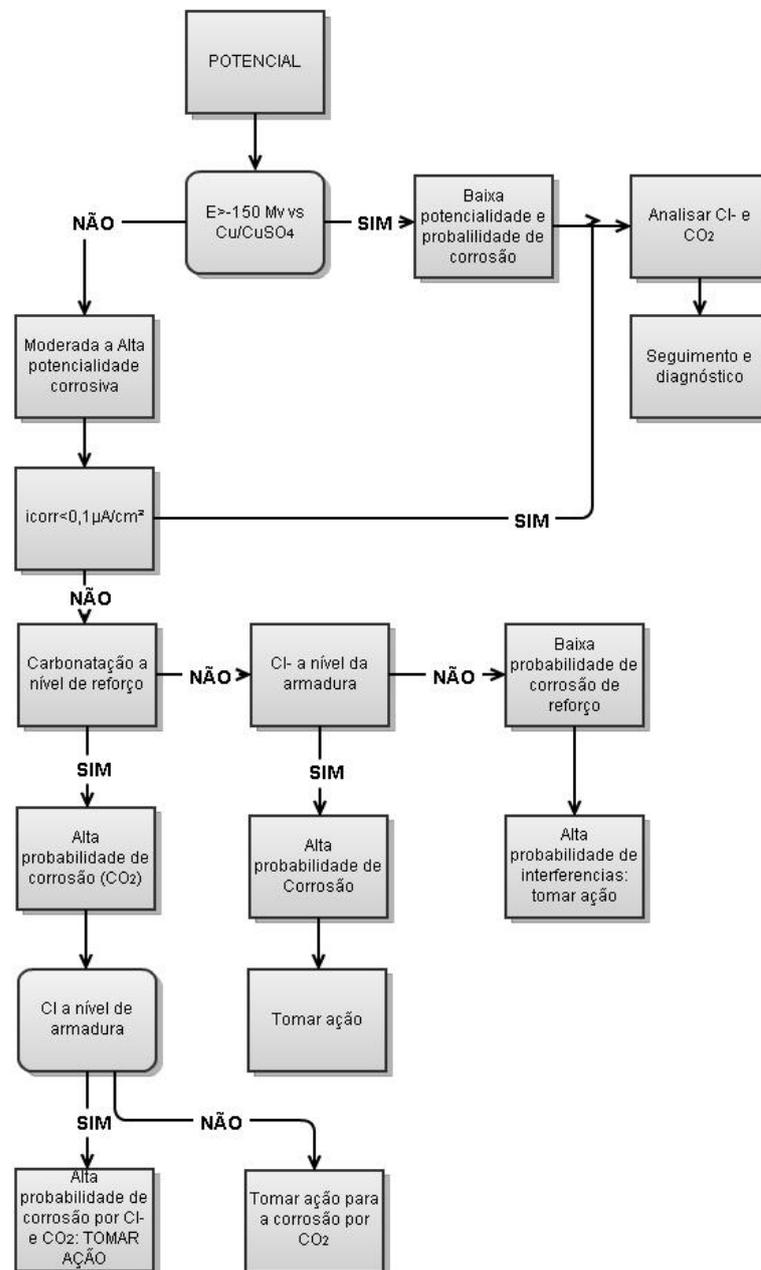
Figura 22 – Eletrodo de referência de cobre



(fonte: adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009)

Com o objetivo de se ter uma precisão maior e de obter um padrão mais rigoroso para o ensaio de potencial de corrosão foi desenvolvida a Norma norte-americana ASTM C87609 – *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* – (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, tradução nossa). O ensaio é descrito de forma resumida na figura 23, e consiste em se avaliar a diferença de potencial entre a armadura e o eletrodo de referência que está junto à superfície do concreto.

Figura 23 – Determinação do potencial de corrosão

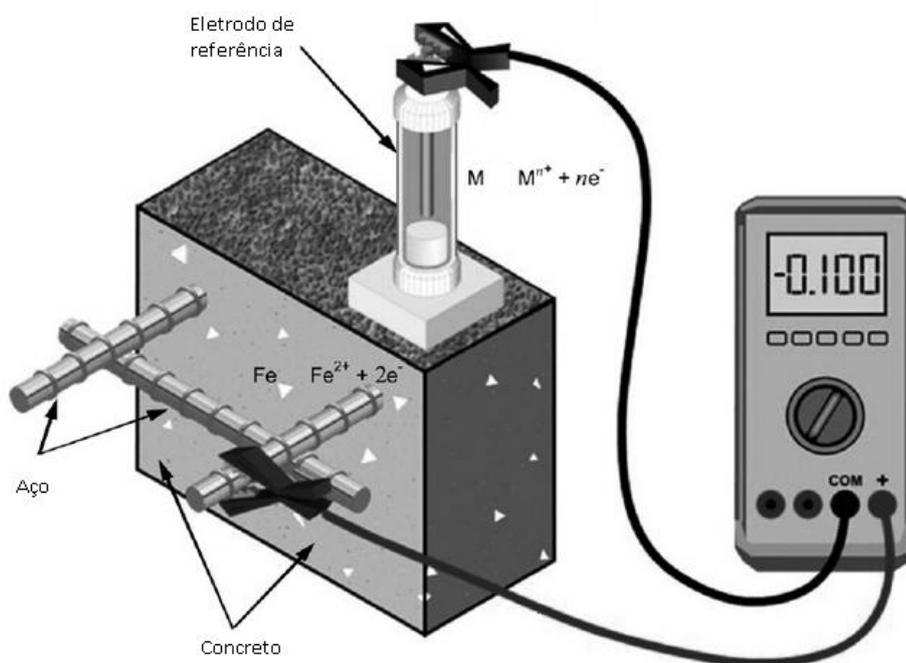


(fonte: RINCÓN et al., 2006, p. 125)

Primeiro deve ser selecionada a área a ser realizado o ensaio, de preferência em um local que seja de fácil acesso à armadura. Como o eletrodo deve estar em contato direto com a armadura, após localizar a armadura, deve ser feita a limpeza com escova de aço e limpar a armadura com acetona ou éter para remover quaisquer restos de pó ou sujidades que interferem no contato com a armadura. Devem ser estabelecidos então pontos de referência no local para auxiliar nas medições (RINCÓN et al., 2006, p. 125-126, tradução nossa).

Para medir o potencial de corrosão é então conectada a ponta positiva do medidor à armadura exposta enquanto o eletrodo de referência (conectado à parte negativa do medidor) é posicionado junto à superfície do concreto, no ponto específico do grid. Para realizar a medição a superfície do concreto deve estar umedecida e geralmente é utilizada uma esponja umedecida entre o concreto e a ponta do eletrodo para melhorar a condutividade (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, tradução nossa). A figura 24 representa esquematicamente como fica a disposição dos materiais no ensaio.

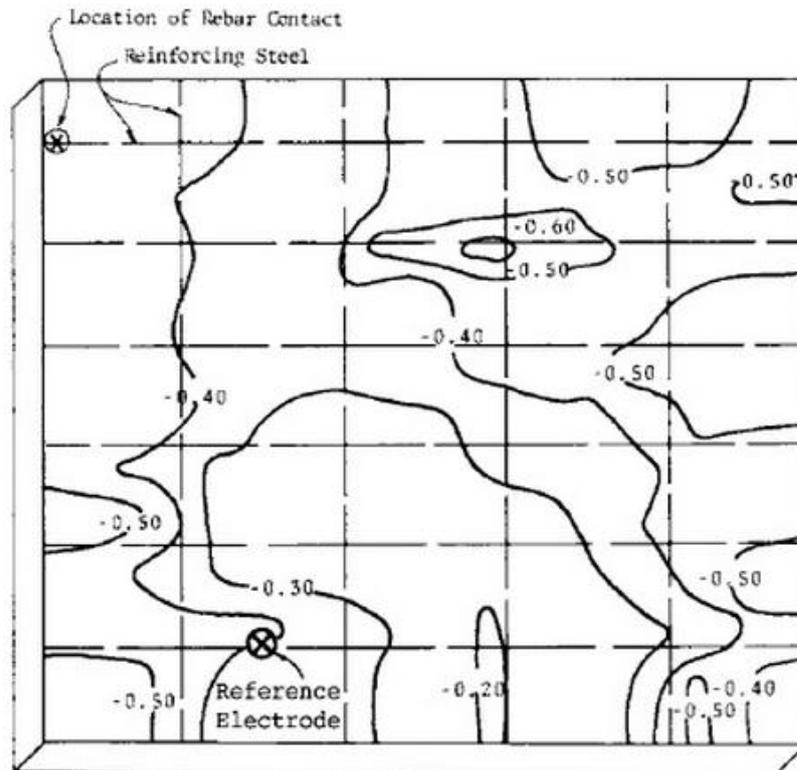
Figura 24 – Ensaio de medida de potencial de corrosão



(fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009)

Após serem realizadas as medições de potencial em todos os pontos do grid estas medidas servem de parâmetros de entrada para se obter o mapa esquemática de potenciais conforme o exemplo da figura 25.

Figura 25 – Mapa de potencial de corrosão



(fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009)

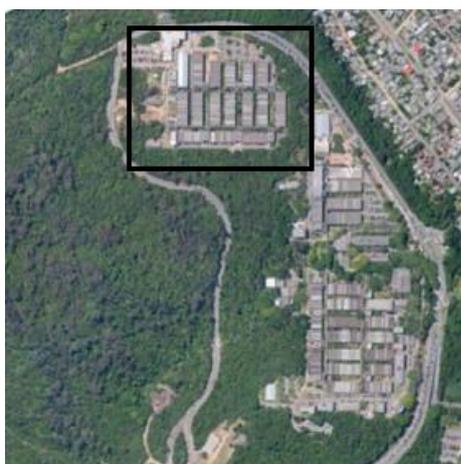
A Norma ASTM C87609 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, tradução nossa) define como via de regra que nos pontos nos quais as leituras forem menores que $-0,35$ V há 90% de probabilidade de a armadura estar corroída. Em compensação quando a estrutura apresentar pontos com leituras de caráter maiores que $-0,20$ V há 90% de probabilidade de a estrutura não estar corroída. Entre estes dois limites o resultado se apresenta incerto e depende das condições do ambiente.

5 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Este capítulo aborda a escolha dos ensaios realizados e da localização, assim como a descrição da estrutura e dos métodos e normas a serem seguidas nos ensaios para a realização do diagnóstico. O local para a realização dos ensaios foi escolhida com base na degradação visual existente nas coberturas e a consequente necessidade de se realizar e registrar uma inspeção da estrutura. Na figura 26 apresenta-se a localização do setor 4 dentro do Campus do Vale, e na figura 27 é apresentada de forma detalhada a passarela dentro do setor 4 e a localização dos pontos em que foram realizados os ensaios.

A passarela é formada por duas partes, sendo que os ensaios foram realizados somente nos elementos de cobertura de concreto que fica na parte superior da estrutura. Os pontos foram escolhidos com base em uma análise visual prévia das coberturas das passarelas no Campus do Vale realizadas por Oliveira (em fase de elaboração)⁵, que focou na análise visual dos elementos indicando os possíveis fenômenos de deterioração e quais eram mais evidentes nesta estrutura. Foram escolhidos então os pontos que representam de modo geral a estrutura e que, além disso, mostrassem uma diferença entre si para fins comparativos.

Figura 26 – Localização do setor 4 no Campus do Vale



(fonte: adaptado de GOOGLE MAPS, c2013a)

⁵ Trabalho de Conclusão de Curso em fase de elaboração com título “Manifestações patológicas: análise de fissuras em passarelas e coberturas no Campus do Vale/UFRGS” do autor Fábio da Silva Oliveira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 27 – Localização dos pontos ensaiados na passarela em relação ao LEME no Campus do Vale

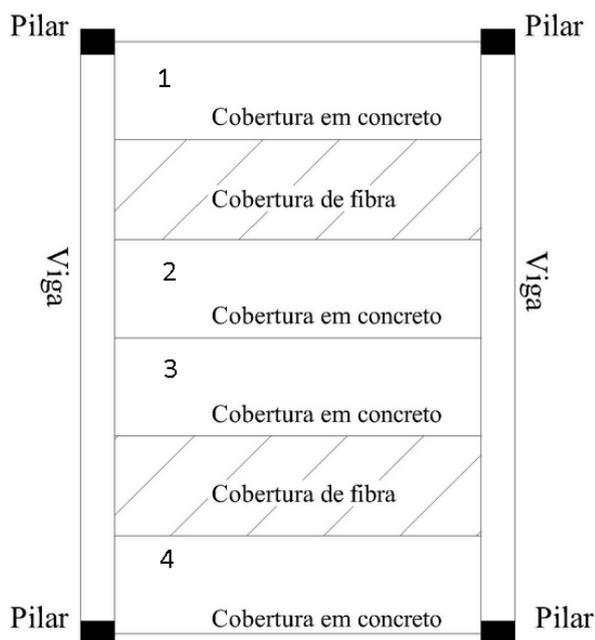


(fonte: adaptado de GOOGLE MAPS, c2013b)

Visto que a estrutura da passarela tem um comprimento de aproximadamente 200 metros, foi necessário separá-las de modo a facilitar a identificação da exata localização dos ensaios, optando-se por fazer a representação da estrutura em módulos conforme a figura 28. Cada módulo é representado por quatro coberturas de concreto armado que foram numeradas em sequência de 1 até 4 seguindo o mesmo sentido dos pontos e duas coberturas de fibra intermediárias.

Foram selecionados sete coberturas de concreto armado conforme indicado pelos pontos amarelos da figura 27 de modo que ficam espaçados de maneira semelhante para se ter uma boa amostragem ao longo da estrutura e para mostrar as diferenças das coberturas entre si. A única exceção é referente aos pontos 3 e 4 que se encontram mais próximos. Isto se deve a condição de que os pontos apresentam extremos diferentes da cobertura, no qual o ponto 3 representa um módulo considerado visualmente não deteriorado enquanto que o ponto 4 representa um dos módulos mais deteriorados entre todas as coberturas.

Figura 28 – Representação de um módulo de cobertura da passarela



(fonte: elaborado pelo autor)

Em cada cobertura escolhida foram realizados quatro ensaios, e que são abordados ao longo deste capítulo. Estes são os ensaios de: caracterização da profundidade de carbonatação, avaliação do potencial de corrosão, análise colorimétrica de cloretos e análise química de identificação de íons cloretos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

O ensaio para determinação da profundidade de carbonatação segue a designação CPC-18 (REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, 1988, p. 453, tradução nossa), na qual cita o uso de uma solução de 1% de fenolftaleína em 70% de álcool etílico como sendo adequado para a medição da espessura carbonatada. Seguindo as instruções do ensaio, para cada ponto escolhido foi removida uma pequena parte do concreto, de forma a permitir a exposição do material interno.

Para a remoção do concreto foram utilizadas uma marreta e um ponteiro de aço conforme mostra a figura 29. Os pontos escolhidos nas coberturas para serem analisados foram os pontos localizados junto às arestas da cobertura e que não estivessem localizados perto de trincas ou fissuras. É então aspergida a solução de fenolftaleína sobre a superfície exposta do

concreto como demonstrado pela figura 30(a) e realizada a medição da profundidade carbonatada conforme mostra a figura 30(b).

Figura 29 – Remoção de uma parte lateral do concreto



(fonte: fotos do autor)

Figura 30 – (a) aspersão da solução em uma parte de concreto exposta;
(b) medição da profundidade carbonatada



(a)



(b)

(fonte: fotos do autor)

As medições foram realizadas conforme as indicações da designação CPC-18 (REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, 1988, p. 454, tradução nossa). Para obtenção da espessura de concreto carbonatada tomou-se como

valor o resultado médio de três medidas da frente mais desfavorável, com a medição sendo realizada com trena a partir da face externa do concreto até a região onde ocorre a mudança de cor (frente de carbonatação). Na figura 31(a) é apresentada a realização do ensaio e medição da espessura carbonatada, e na figura 31(b) um exemplo de armadura já carbonatada. Após a realização dos ensaios foi então contatada a prefeitura do Campus do Vale para que se procedesse ao fechamento destes pontos

Figura 31 – (a) medição da frente carbonatada e (b) exemplo de concreto carbonatado



(fonte: fotos do autor)

5.2 IDENTIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE ÍONS CLORETO

Foram realizados dois tipos de ensaios para determinar a presença de íons cloretos no concreto, um ensaio qualitativo de identificação colorimétrica e um ensaio quantitativo, o de análise química. Abaixo segue a descrição dos procedimentos adotados nestes ensaios.

5.2.1 Ensaio colorimétrico para determinação de íons cloreto

O ensaio colorimétrico segue a descrição do ensaio feito por Collepardi et al⁶. (1970 apud STANISH et al., 2000, p. 13, tradução nossa), no qual foi utilizada uma solução de nitrato de

⁶ COLLEPARDI, M.; MARCIALIS, A.; TURRIZUANI, R. Kinetics of Penetration of Chloride Ions into the Concrete. **II Cemento**, [S. l.], n. 4, p. 157-164, 1970.

prata em uma concentração aquosa de 0,1 mol/l (17 g/l). Da mesma forma que o ensaio para verificação da profundidade de carbonatação, o ensaio exige a exposição de uma parte interna do concreto que esteja protegida do ambiente e que não apresente fissuras próximas. Após a exposição da armadura do concreto foi realizada a aspersão da solução na superfície conforme a figura 32(a), e então verificada a coloração resultante da reação entre o concreto e a solução de nitrato de prata e fotografados os pontos para posterior análise.

É importante que se possam distinguir nas fotos as diferentes colorações que assume o concreto exposto, visto que na Norma UNI 7928 (ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE, 1978, tradução nossa) a coloração é que define o resultado do ensaio. Se o concreto apresentar uma coloração mais clara, tendendo ao branco, isto indica a presença de cloretos. Já no caso de se apresentar uma coloração marrom-escura, tendendo ao negro, a prata não reage com os íons cloreto e acaba por se oxidar, indicando que a amostra está praticamente livre de cloretos. Na figura 32(b) é retratado um dos pontos em que foi realizado o ensaio.

Figura 32 – (a) aspersão do nitrato de prata na superfície do concreto
(b) retrato da superfície após o ensaio colorimétrico



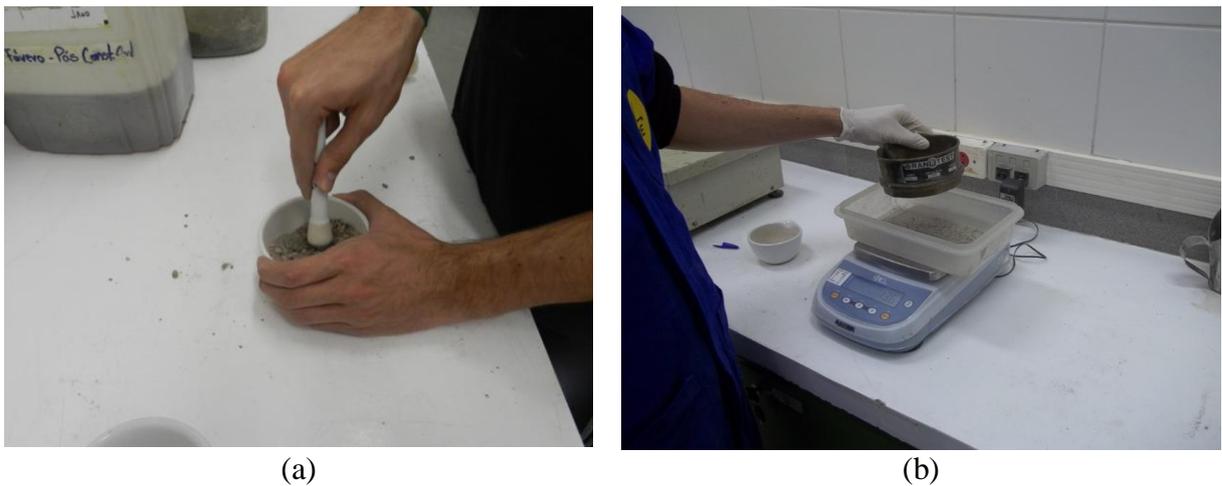
(fonte: fotos do autor)

5.2.2 Ensaio de análise química de íons cloreto

Para a análise química de cloretos foi seguida a Norma NBR 9917 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) que indica a remoção de uma parte do

concreto e esmagamento conforme a figura 33(a). Este processo continua até se obter a passagem de 20 g na peneira de 2,36 mm de abertura de malha como apresentado na figura 33(b). Este processo foi repetido 7 vezes (uma para cada ponto) e as amostras foram então acondicionadas em recipientes individuais conforme a figura 34 e posteriormente levadas ao laboratório para a análise química.

Figura 33 – (a) esmagamento do concreto e (b) passagem do pó de concreto pela peneira de 2,36 mm



(fonte: fotos do autor)

Figura 34 – Acondicionamento das amostras



(fonte: foto do autor)

No laboratório cada uma das 7 amostras de 20 g foram separadas em duas resultando em 14 amostras de aproximadamente 10 g. Foi então adicionado às amostras 100 mL de água destilada a aproximadamente 80°C dentro de um frasco de Erlenmeyer de 250 mL e agitado por dez minutos. A solução foi então passada por um filtro médio (figura 35 (a)) e após o resfriamento da água até a temperatura ambiente, foi completado o balão volumétrico de 250 mL com água destilada. Com o auxílio de uma micropipeta, retirou-se 0,05 mL e fez-se uma nova diluição em um balão volumétrico de 100 mL (figura 35(b)).

Figura 35 – (a) passagem da amostra pelo filtro e (b) diluição com o uso da micropipeta



(a)

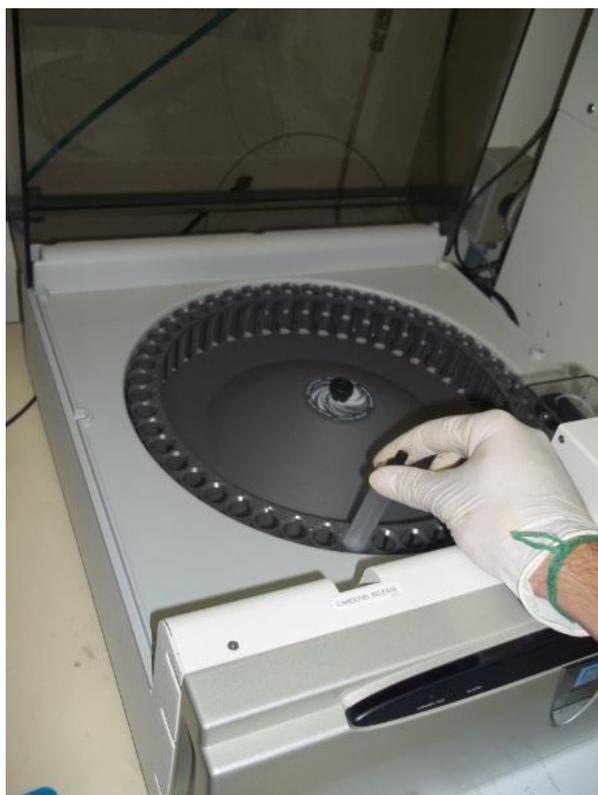


(b)

(fonte: fotos do autor)

As amostras foram então encaminhadas ao cromatógrafo iônico para a análise de concentração dos íons cloreto conforme apresenta a figura 36. O processo realizado pelo cromatógrafo consiste, conforme Fernandes (2008, p. 58-59), na identificação e quantificação dos íons cloreto através da comparação com curvas pré-definidas. A determinação pelo software ocorre durante a troca iônica, em íons de mesmo sinal entre uma solução e um corpo sólido muito insolúvel (íons cloreto).

Figura 36 – Colocação da amostra no cromatógrafo



(fonte: foto do autor)

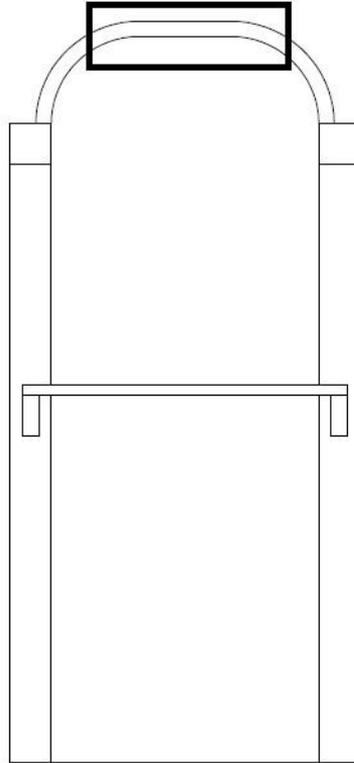
5.3 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO

O ensaio que mede o potencial de corrosão seguiu os moldes estabelecidos pela Norma ASTM C87609 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009, tradução nossa). A localização dos sete pontos se manteve a mesma, porém a parte da cobertura sobre a qual foi realizado o ensaio teve que ser na parte mais plana da estrutura (figura 37 dentro do quadrado preto) por questões de contato do eletrodo de referência. Para se garantir uma estabilidade da leitura, os pontos medidos com o eletrodo de referência deviam estar conectados à armadura através do concreto (não deve existir desconexão da armadura).

Por isso na escolha da abertura dos pontos para conexão do grampo metálico na barra de aço da estrutura escolheu-se um ponto próximo para se realizar a medição. Esta abertura foi realizada com o uso de marreta e ponteiro (figura 38(a)), a limpeza da barra exposta foi

realizada com o uso de uma escova de aço (figura 38 (b)), de acetona (figura 39 (a)) e após este processo foi conectado a parte positiva do medidor à estrutura conforme a figura 39(b).

Figura 37 – Localização da área do ensaio na estrutura



(fonte: foto do autor)

Figura 38 – (a) localização da armadura e (b) limpeza da armadura com escova de aço



(a)



(b)

(fonte: fotos do autor)

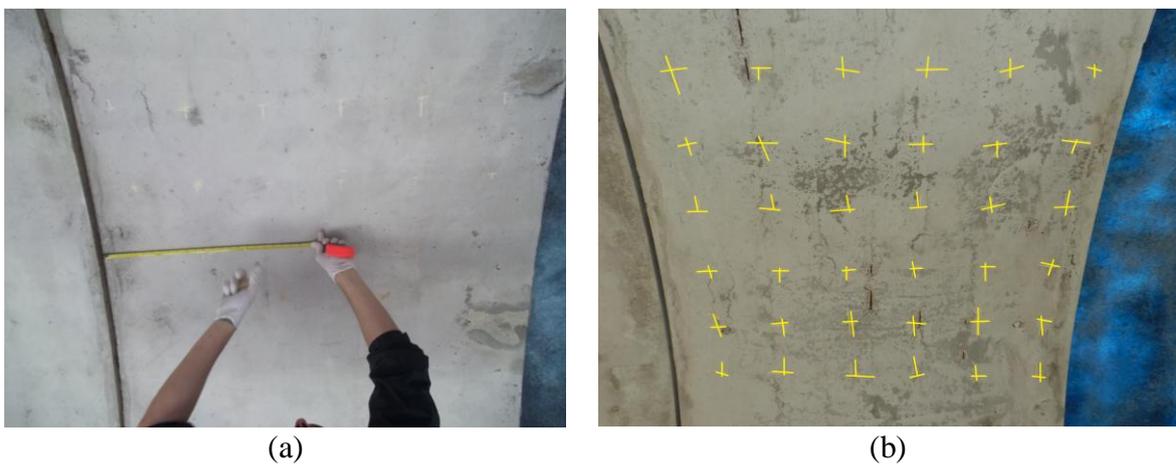
Figura 39 – (a) limpeza da armadura com acetona e (b) colocação da parte positiva junto à armadura



(fonte: fotos do autor)

Depois de conectado a parte positiva do medidor à armadura, foram marcados os pontos do grid que serviram de apoio para a realização das medidas, de maneira a tornar mais prática a análise posterior dos pontos pelo software. A marcação do grid foi realizada com o auxílio de uma trena e de giz (figura 40(a)), e os pontos foram espaçados a cada 20 cm conforme mostra a figura 40(b).

Figura 40 – (a) marcação do grid com a trena e (b) grid marcado com giz



(fonte: fotos do autor)

Para se realizar a medição e obter uma condutividade mais estável e correta, foi então molhada a superfície (figura 41) e posteriormente realizada a medição de cada ponto do grid com a utilização do aparelho para medição CPV-4. O CPV-4 é apresentado na figura 42(a), na qual aparece o voltímetro, o grampo metálico preso à armadura e o eletrodo de referência, e

na figura 42(b) é apresentada a realização do ensaio de potencial de corrosão. Os resultados foram então anotados e encaminhados ao software para obtenção das curvas de potencial.

Figura 41 – Molhagem da laje

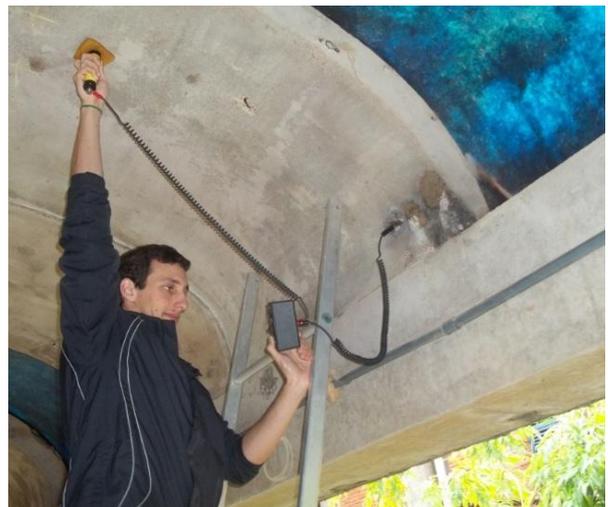


(fonte: foto do autor)

Figura 42 – (a) aparelho para medição de potencial e (b) realização do ensaio com o aparelho CPV-4



(a)



(b)

(fonte: fotos do autor)

6 RESULTADOS E DIAGNÓSTICO DO NÍVEL DE DETERIORAÇÃO

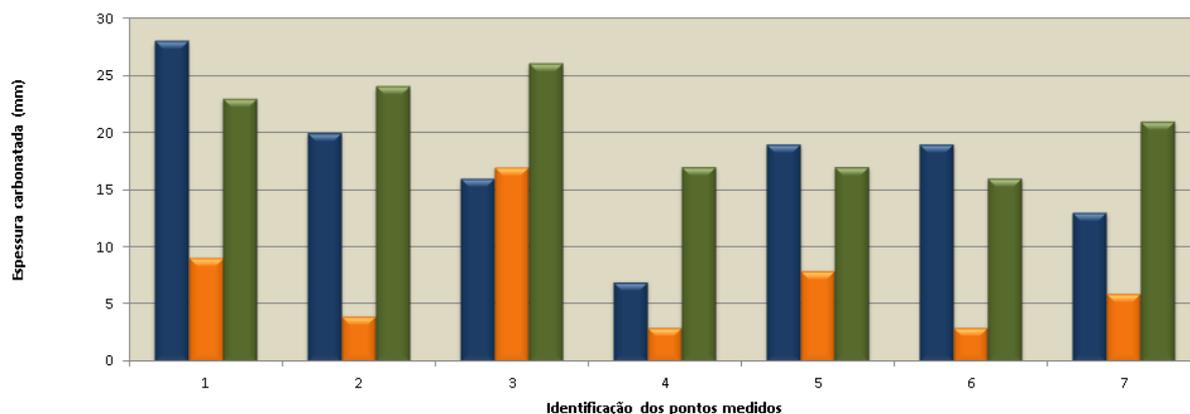
São apresentados a seguir os resultados obtidos através dos ensaios realizados, seguindo-se as observações do capítulo 5. Juntamente aos resultados são apresentadas as análises dos pontos mais críticos e os diagnósticos da estrutura.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROFUNDIDADE CARBONATADA

Os resultados obtidos de cada ponto no ensaio podem ser observados na figura 43, sendo que a espessura carbonatada em milímetros aparece em azul, a espessura de cobrimento mínima em laranja e a espessura máxima em verde. Também são apresentados com mais detalhes na tabela 4 juntamente com seu respectivo cobrimento. É necessário ressaltar quanto ao cobrimento, que foi observado uma grande variabilidade dentro da mesma cobertura, que é representado nas colunas de cobrimento mínimo e máximo. Estas medidas de cobrimento mínimo e máximo foram realizadas a partir da verificação da existência de diferenças significativas de cobrimento dentro da estrutura, observando-se os pontos onde havia deslocamento do concreto (geralmente nas partes curvas) e os pontos de medição de cobrimento no próprio ensaio de carbonatação respectivamente.

Foi possível observar nas coberturas onde há deslocamento do concreto, principalmente nas partes curvas, ponto onde o cobrimento é pequeno, sendo da ordem de três a sete milímetros em alguns pontos, o que possibilita uma despassivação mais rápida da armadura. Estes fatos podem ser explicados por Bertolini (2010), Souza e Ripper (1998) e Helene (1986) devido à má execução aliado aos descuidos em relação ao cobrimento mínimo a ser mantido ao longo da estrutura. Deve ser notada também a dificuldade de posicionamento da armadura devido ao seu formato em curva, que se projetado de maneira diferente poderia retardar o início do processo corrosivo e aumentar assim a vida útil da estrutura.

Figura 43 – Representação das estruturas carbonatadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4 – Medidas de profundidade carbonatadas

Ponto	Cobertura (Localização)	Espessura Carbonatada Média (mm)	Cobrimento da Armadura Mínimo (mm)	Cobrimento da Armadura Máximo (mm)
1	Módulo 3 Laje 2	28	9	23
2	Módulo 8 Laje 3	20	4	24
3	Módulo 12 Laje 3	16	17	26
4	Módulo 13 Laje 3	7	3	16
5	Módulo 17 Laje 1	19	8	17
6	Módulo 22 Laje 2	19	3	16
7	Módulo 26 Laje 2	13	6	21

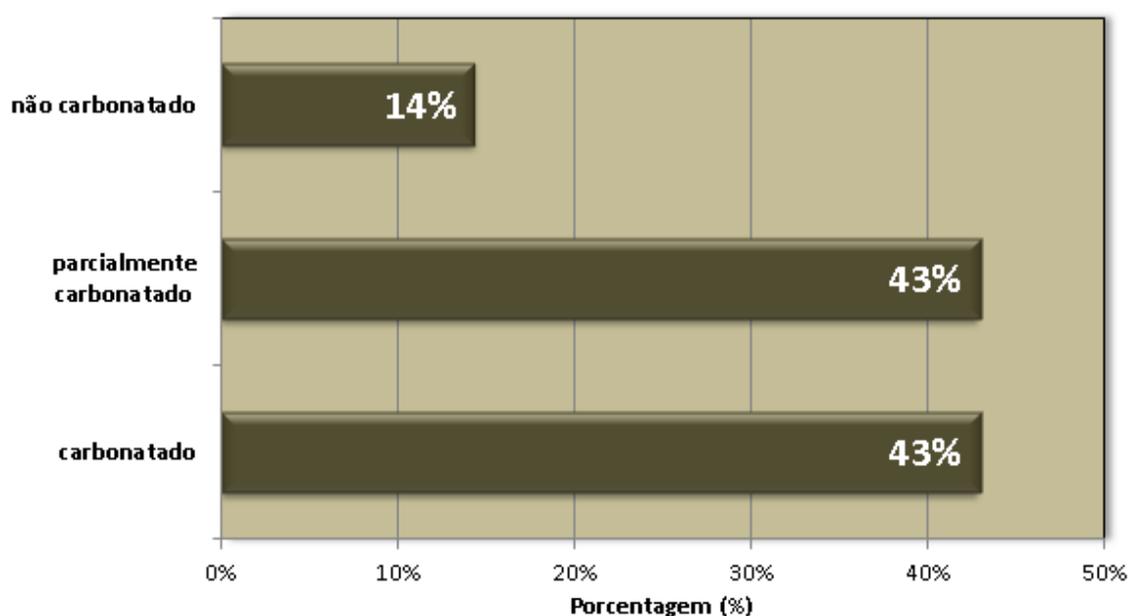
(fonte: elaborado pelo autor)

É possível notar a partir dos resultados a diferença de cobrimento das armaduras, tanto entre si quanto dentro da própria cobertura e que se considerados os cobrimentos mínimos pela Norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), considerando uma laje em ambiente de agressividade classe II (25 mm), nenhuma estaria em conformidade. Em diversos pontos também foi possível notar visualmente durante a execução do ensaio a perda de seção das armaduras e formação de ferrugem, processos que resultam na deterioração da estrutura conforme relatado por Mehta e Monteiro (1994).

Na figura 44 é apresentado o percentual das armaduras das coberturas onde foram realizados os ensaios que já perderam a proteção da camada passivadora para auxiliar na manutenção do

pH próximo a armadura. Como foi observada que existe uma diferença de cobrimento dentro da mesma cobertura, a armadura não irá perder sua proteção física de maneira igual ao longo do perímetro da cobertura. Isto faz com que existam partes em que a armadura está protegida ou parcialmente protegida e casos em que não há mais esta proteção dentro da mesma cobertura.

Figura 44 – Representação do percentual das armaduras das coberturas carbonatadas

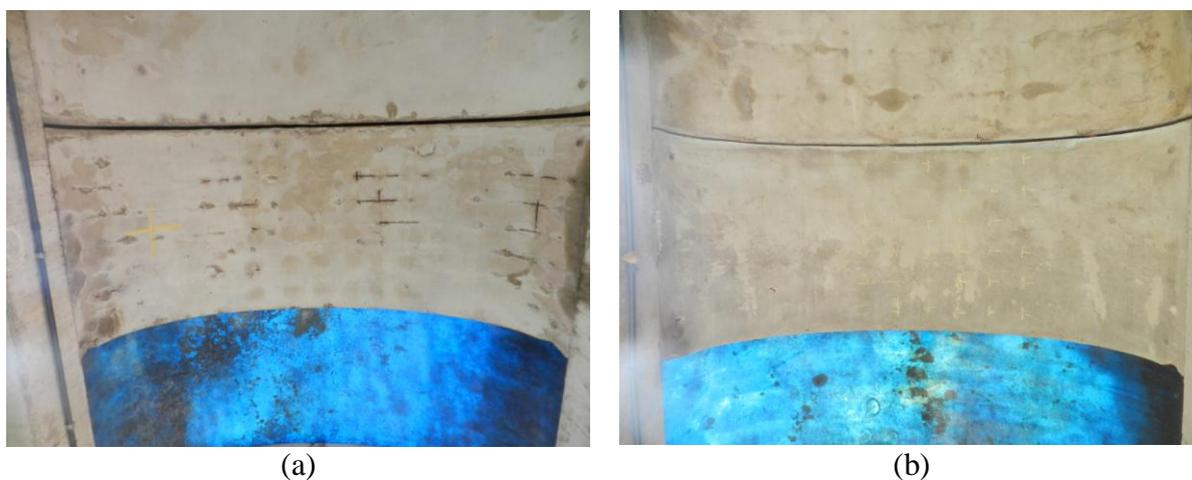


(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 45(a) referente ao ponto 2 demonstra como se encontra uma armadura parcialmente carbonatada. É possível identificar a exposição da armadura que ocorre na parte central da cobertura (devido a um cobrimento menor), apresentando também uma parte da cobertura que se encontra aparentemente sã próximo das extremidades. A figura 45(b) que foi tirada do ponto 3 quase não apresenta indícios de corrosão da cobertura, isto é explicado por Helene (1986) devido à baixa espessura carbonatada e ao cuidado um pouco maior no posicionamento da armadura. Verificou-se também, apesar de não serem feitos ensaios neste sentido, uma facilidade maior na remoção do concreto no ponto 2 comparado ao ponto 3, que pode indicar uma qualidade melhor do concreto (adensamento, f_{ck} ou melhor controle de qualidade), o que afetaria também a vida útil da estrutura.

Um ponto salientado por Bromfield (2011) e Rincón et al. (2006), diz que é possível calcular a velocidade de carbonatação em função da espessura carbonatada e sabendo a data de construção da estrutura. O objetivo deste cálculo é determinar o tempo que leva para a frente de carbonatação atingir a armadura. Este cálculo não é adequado a estas coberturas tendo em vista que o cobrimento é muito variável e a frente de carbonatação já atingiu a armadura em algum ponto.

Figura 45 – (a) cobertura do ponto 2 e (b) cobertura do ponto 3



(fonte: fotos do autor)

6.2 IDENTIFICAÇÃO DA PRESENÇA DE ÍONS CLORETO

A seguir são apresentados os resultados para os ensaios que auxiliam na determinação da presença de íons cloreto. Primeiramente são apresentadas as fotos do resultado de aspersão de nitrato de prata e analisadas conforme a bibliografia estudada e depois são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios de laboratório para auxiliar na determinação de cloretos através da análise química.

6.2.1 Ensaio colorimétrico para determinação de íons cloreto

A figura 46 apresenta os resultados para os pontos de número 1 até número 7 em sequência para o ensaio colorimétrico utilizando-se a aspersão da solução de nitrato de prata.

Figura 46 – Ensaio colorimétrico de cloretos nos pontos de numero 1 até 7



(a) ponto 1



(b) ponto 2



(c) ponto 3



(d) ponto 4



(e) ponto 5



(f) ponto 6



(g) ponto 7

(fonte: fotos do autor)

A execução e os resultados do ensaio de aspersão de nitrato de prata são obtidos de forma mais rápida do que os da análise química e nos fornecem um resultado preliminar da presença de íons cloreto no concreto. Conforme o trabalho realizado por Otsuki et al.⁷ (1992, apud STANISH et al., 2000), o ponto de virada da coloração da solução de nitrato de prata é correspondente a 0,019% sobre o peso de concreto, abaixo do indicado como danoso a estrutura por Broomfield (2011), que sugere este limite como sendo 0,05% sobre o peso de concreto.

É possível observar nas figuras a ausência de pontos brancos ou de coloração mais esbranquiçada, e que conforme os trabalhos desenvolvidos por Collepardi et al.⁸ (1970 apud STANISH et al., 2000) indicam a presença de íons cloretos em quantidade menor que 0,019% da massa de concreto e em conformidade com o limite descrito por Broomfield (2011). Estes resultados demonstram que a princípio que a estrutura não se encontra despassivada pelo efeito dos íons cloreto e que os riscos são relativamente pequenos neste quesito. Observa-se em algumas figuras, mais especificamente na figura 46(e) referente ao ponto 5, a presença de manchas pretas e de coloração mais escura. Isto se deve à reação da prata que esta na solução com os hidróxidos presentes no concreto, criando assim uma substância de coloração escura que indica uma presença baixa de íons cloreto livre no concreto.

⁷ OTSUKI, N.; NAGATAKI, S.; NAKASHITA, K. Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials. *ACI Materials Journal*, Farmington Hills, USA, v. 89, n. 6, p. 587-592, 1992.

⁸ COLLEPARDI, M.; MARCIALIS, A.; TURRIZUANI, R. Kinetics of Penetration of Chloride Ions into the Concrete. *II Cimento*, [S. l.], n. 4, p. 157-164, 1970.

6.2.2 Ensaio de análise química de íons cloreto

O ensaio de análise química é um ensaio realizado em laboratório, que fornece resultados mais precisos sobre o percentual de íons cloretos presentes no concreto. Juntamente com o ensaio colorimétrico fornece uma base de dados suficiente para confirmar ou refutar a existência significativa da presença de íons cloreto no concreto. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos da análise química, expresso em percentual sobre a massa de concreto.

O resultado obtido do ensaio de cromatografia iônica é a concentração (mg/L). A partir deste resultado são calculados a concentração no balão volumétrico e o resultado final da análise, que é expresso em termos percentuais. O resultado em termos percentuais é obtido através da divisão da massa da amostra de concreto pela concentração obtida no ensaio.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de análise química do concreto

Amostra	Massa pesada de concreto (g)	concentração (mg/L)	% sobre a massa de concreto
P1 A	10,0966	1,624	0,00402
P1 B	10,0148	1,746	0,00436
P2 A	10,5861	1,900	0,00449
P2 B	10,0235	2,816	0,00702
P3 A	10,0021	1,804	0,00451
P3 B	10,0433	2,126	0,00529
P4 A	10,4060	1,639	0,00394
P4 B	9,1818	1,161	0,00316
P5 A	10,0099	2,035	0,00508
P5 B	10,0411	2,918	0,00727
P6 A	10,0231	1,937	0,00483
P6 B	10,2352	1,782	0,00435
P7 A	10,0667	2,657	0,00660
P7 B	10,0139	2,694	0,00673

(fonte: elaborada pelo autor)

Os resultados do ensaio de análise química confirmam os resultados obtidos no ensaio colorimétrico e afirmam a presença de uma quantidade de cloretos abaixo da mínima descrita por Broomfield (2011) de 0,05% sobre o peso da massa de concreto.

Estes resultados reforçam a avaliação com base nas descrições de Rincón et al. (2006) e Bertolini (2010) de que o atual estado de corrosão da estrutura se deve principalmente pela carbonatação do concreto que despassivou a armadura e muito possivelmente a erros na hora da execução. Estas falhas acabam por despassivar a armadura gerando pontos de corrosão generalizada onde ocorre posteriormente a redução do pH e as reações eletroquímicas descritas por Souza e Ripper (1998) que levam a corrosão das armadura.

6.3 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO

A partir da obtenção dos dados referentes ao potencial de corrosão de cada ponto, foram analisadas e organizadas as medidas em planilhas para inserir no software Golden Surfer. Este software interpola os dados da planilha e gera um mapa de linhas equipotenciais para facilitar a visualização dos pontos críticos da estrutura. É importante ressaltar que os mapas equipotenciais gerados tem como orientação norte o LEME e foram realizados na parte do meio das coberturas, seguindo o posicionamento de acordo com a figura 47.

Para a análise dos dados foi levado em conta a Norma ASTM C87609 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009) que define uma probabilidade de 90% da armadura estar corroída nos pontos onde as leituras forem menores que $-0,35$ V e 90% de chance da armadura não estarem corroídas nos pontos onde as leituras forem maiores que $-0,20$ V. Entre estes limites o resultado se apresenta como incerto e depende das condições ambientais onde se encontra a estrutura.

Figura 47 – Localização dos pontos ensaiados na passarela em relação ao LEME no Campus do Vale



(fonte: adaptado de GOOGLE MAPS, c2013b)

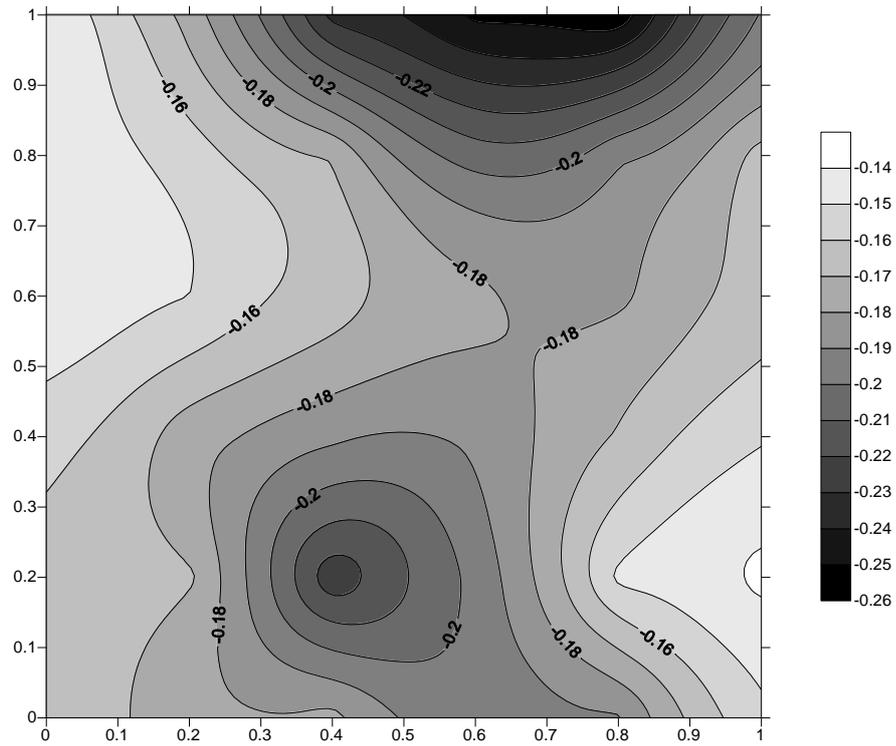
Figura 49 – Cobertura referente ao ponto 1



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 50 apresenta o mapa equipotencial do ponto 2 localizada na laje de concreto 3 do módulo 8 e a figura 51 apresenta o ponto 2 na cobertura. É possível verificar que o mapa equipotencial indica duas regiões que se encontram com deslocamento do concreto e exposição da armadura como uma região de probabilidade incerta de corrosão pois se encontra entre os níveis de $-0,35\text{ V}$ e $-0,20\text{ V}$, enquanto que outras áreas se encontram com probabilidade de 90 % da estrutura não estar corroída, evidenciado pelos valores maiores que $-0,20\text{ V}$ (regiões mais claras).

Figura 50 – Mapa equipotencial do ponto 2



(fonte: elaborado pelo autor)

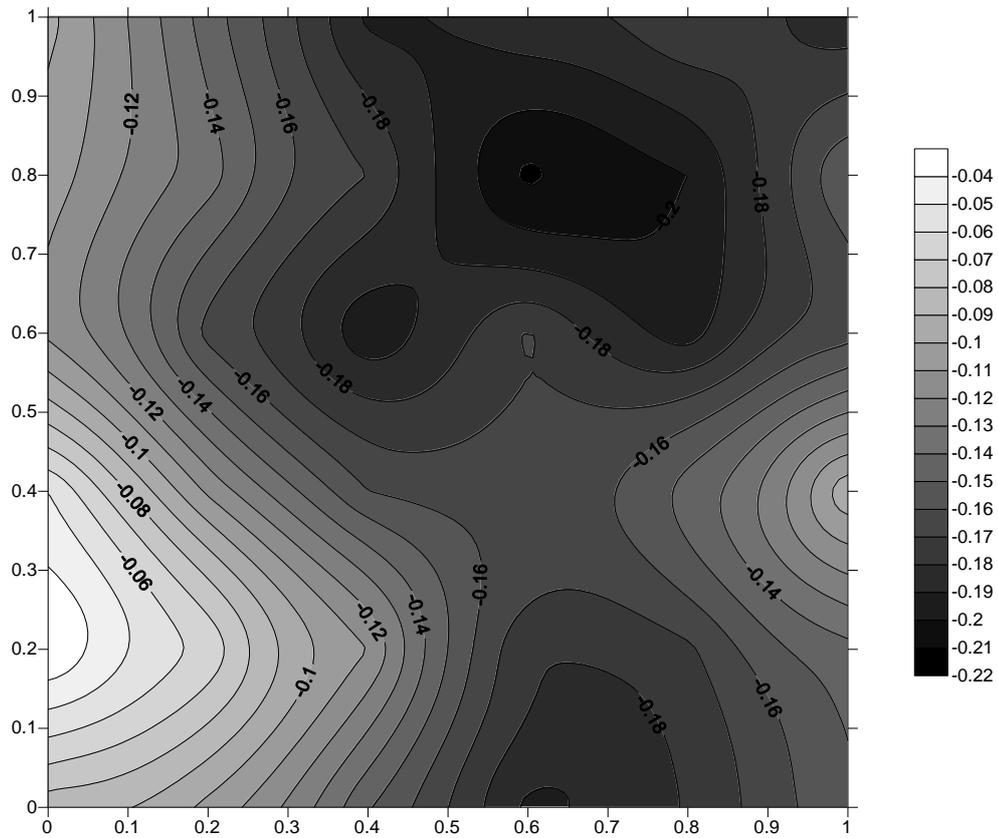
Figura 51 – Cobertura referente ao ponto 2



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 52 apresenta o mapa equipotencial do ponto 3 localizada na laje de concreto 3 do módulo 12 e a figura 53 apresenta o ponto 3 na cobertura. O ponto 3 é um dos que se encontra em melhores condições aparentes, apresentando na sua maioria pontos maiores que $-0,20$ V, com um pequeno foco na parte superior do mapa equipotencial, indicando uma probabilidade incerta de corrosão (mancha escura).

Figura 52 – Mapa equipotencial do ponto 3



(fonte: elaborado pelo autor)

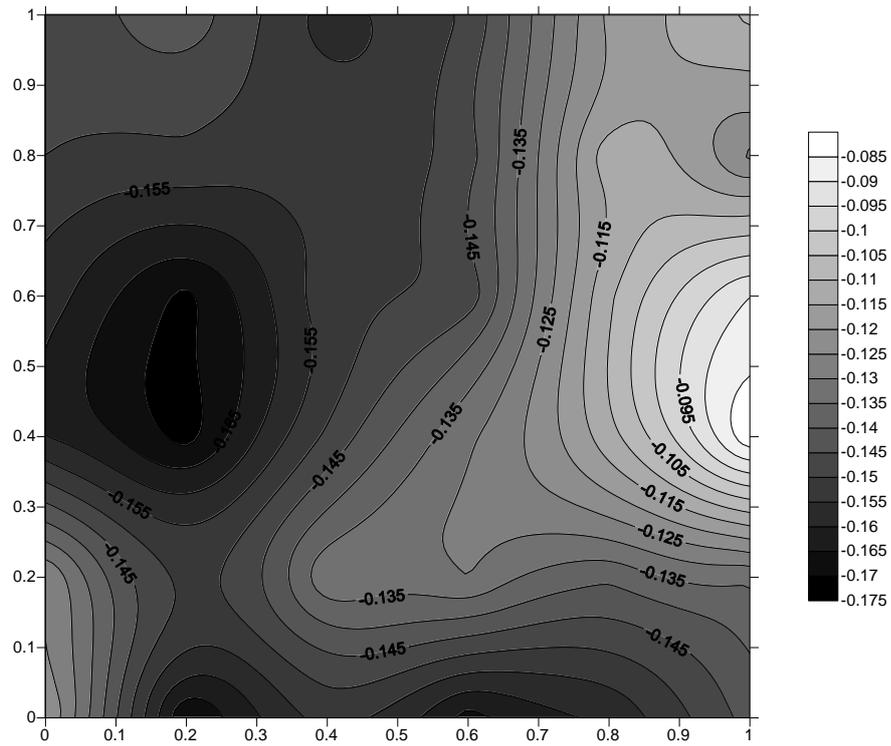
Figura 53 – Cobertura referente ao ponto 3



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 54 apresenta o mapa equipotencial do ponto 4 localizada na laje de concreto 3 do módulo 13 e a figura 55 apresenta o ponto 4 na cobertura. O ponto 4 foi um dos pontos que mostrou grande divergência dos resultados obtidos e do estado em que se encontra a cobertura. As áreas mais escuras no mapa equipotencial até estão relativamente de acordo com a cobertura, mas o valor absoluto encontrado nestes pontos é em torno de $-0,18$ V o que indicaria que há 90% de probabilidade de não haver corrosão. Este resultado é inesperado visto que a estrutura encontra-se visivelmente corroída segundo a definição de Helene (1986) no sentido em que há alteração do material e de suas propriedades, como a oxidação da armadura e formação de ferrugem.

Figura 54 – Mapa equipotencial do ponto 4



(fonte: elaborado pelo autor)

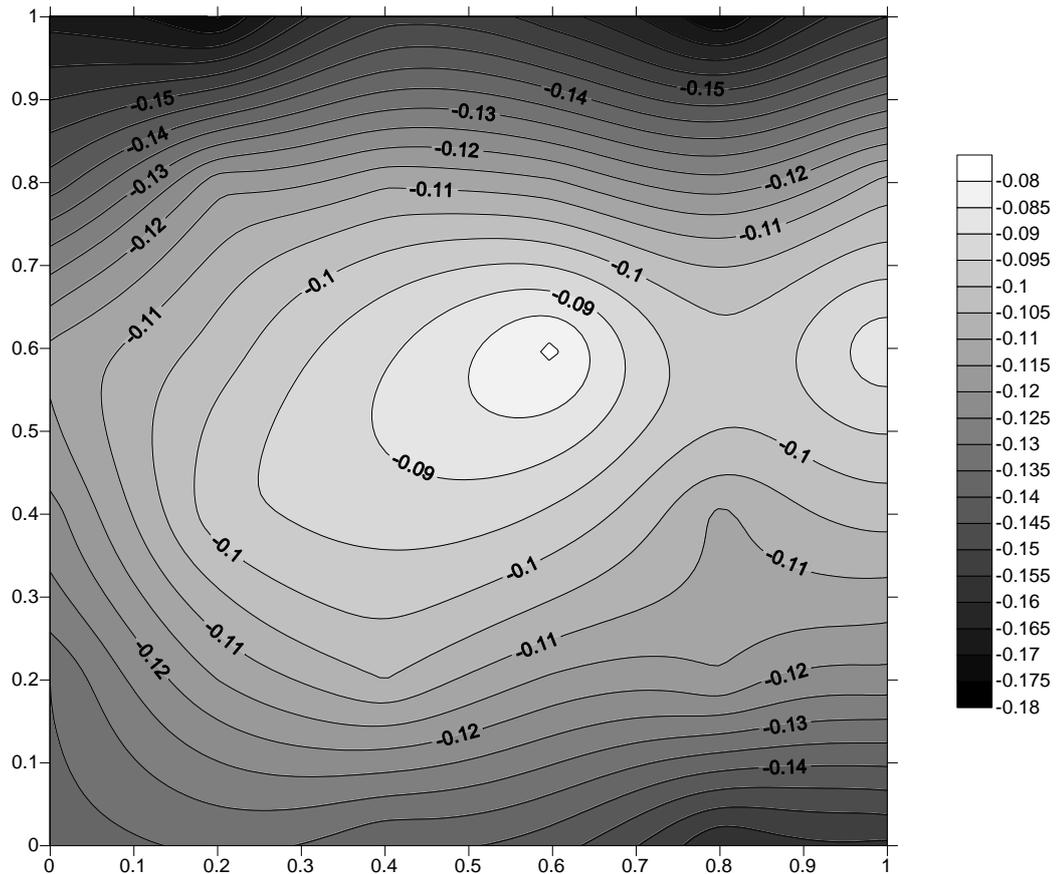
Figura 55 – Cobertura referente ao ponto 4



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 56 apresenta o mapa equipotencial do ponto 5 localizada na laje de concreto 1 do módulo 17 e a figura 57 apresenta o ponto 5 na cobertura. O ponto 5 foi um dos pontos que mostrou mais coerência nos resultados. A cobertura encontra-se em um estado de conservação aparentemente razoável, ponto que é demonstrado pelas leituras todas maiores que $-0,20$ V.

Figura 56 – Mapa equipotencial do ponto 5



(fonte: elaborado pelo autor)

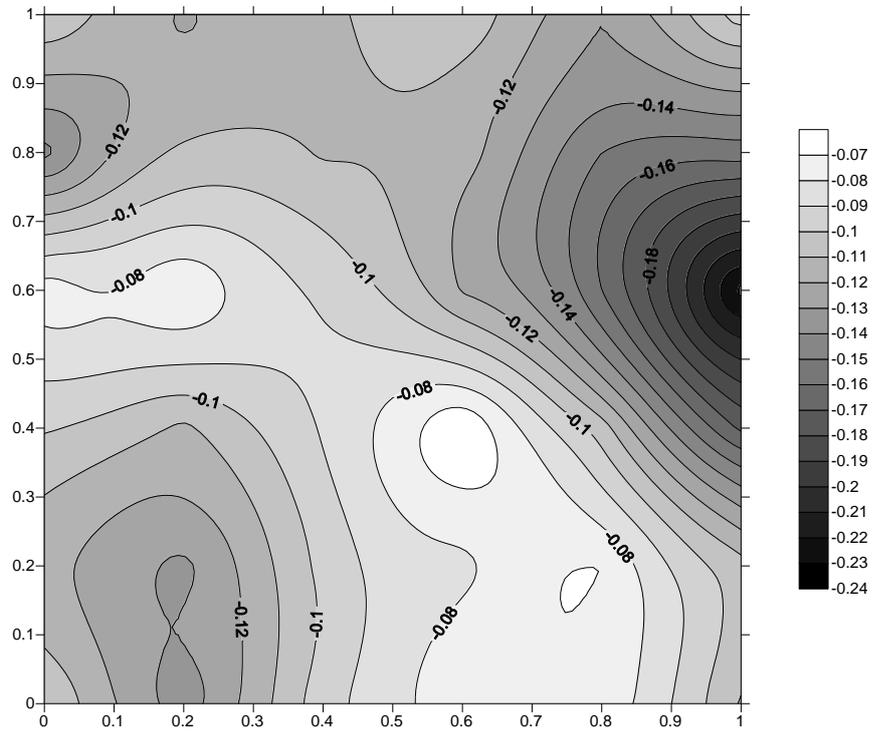
Figura 57 – Cobertura referente ao ponto 5



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 58 apresenta o mapa equipotencial do ponto 6 localizada na laje de concreto 2 do módulo 22 e a figura 59 apresenta o ponto 6 na cobertura. O ponto 6 demonstrou resultados um pouco abaixo dos esperados sendo que esta cobertura estava com uma deterioração visível um pouco maior. Entretanto a parte com maior potencial de corrosão demonstrado pelo mapa equipotencial na parte direita pela mancha mais escura é condizente com a realidade.

Figura 58 – Mapa equipotencial do ponto 6



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 59 – Cobertura referente ao ponto 6



(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a Norma ASTM C87609 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009) a maior parte das estruturas se encontra em um estado em que se pode afirmar com 90% de probabilidade de não haver corrosão, ainda que existam alguns pontos em que os mapas de potencial indicam uma situação indefinida (entre -0,2 V e -0,35 V).

Estes resultados são de certa forma incoerentes com a realidade encontrada, pois tomando o ponto 4 como exemplo, é possível notar-se que existe corrosão conforme a descrição feita por Helene (1986), que inclui modificação do material (aço) e expulsão do revestimento. É importante ressaltar que foram seguidas todas as recomendações de execução do ensaio da Norma ASTM C87609 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009) e observados também os detalhes descritos no processo detalhado por Rincón et al. (2006).

Uma hipótese levantada a partir da análise bibliográfica segundo Broomfield (2011) para explicar esta diferença dos valores obtidos com os valores esperados, é a de que possa estar relacionado com problemas referentes à calibração do equipamento. Os ensaios também foram repetidos em vários pontos por se encontrar o resultado inadequado, entretanto encontrando sempre os mesmos valores medidos.

Outras tentativas de medições foram feitas alterando a solução de sulfato de cobre presente no eletrodo de referência, estes resultados porém revelaram-se praticamente iguais aos anteriores anulando esta hipótese. Tentou-se contatar o fabricante do medidor e seguir as instruções do manual de operação do aparelho além de outras medidas porém sem apresentar sucesso.

Foi utilizado também em uma medição posterior o aparelho de medição de potencial GECOR. Este aparelho apresentou problemas devido a sua dificuldade de operação por ser muito complexo, além de apresentar medidas também consideradas baixas, em torno de -0,002 V para vários pontos. Podem ser consideradas outras hipóteses como a desconexão da armadura dentro do concreto em algum ponto, conexão inadequada do terminal positivo junto a armadura ou armadura de diâmetro inferior à necessária para as medições.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos direcionados à ampliação do conhecimento relativo ao concreto armado e em especial a parte que engloba a corrosão das armaduras são de grande importância. Devido à larga utilização do concreto armado como material na construção é necessário que existam avanços no que diz respeito a sua durabilidade, o que se traduz cada vez mais numa redução dos aspectos deficientes que causam a degradação precoce da estrutura e expectativa menor de sua vida útil.

Neste sentido a corrosão ocupa um espaço importante e conforme exposto por Dal Molin (1988) representa grande parte da origem das manifestações patológicas. Cada vez mais o processo de corrosão tem sido estudado de modo a se reduzir o efeito negativo deste processo nas estruturas e também na tentativa de se reduzir dentro do possível o seu número futuro de ocorrências nas estruturas projetadas.

Para que se tenha uma noção mais correta do estado de conservação em que se encontra a estrutura para assim analisar os impactos decorrentes da corrosão, é necessário realizar uma inspeção da estrutura. Esta inspeção foi realizada em duas partes, uma análise visual preliminar e outra mais detalhada, usando equipamentos que mensurem o estado da estrutura. Nestes ensaios obteve-se uma base de dados para realização do diagnóstico mais preciso.

Este trabalho focou na análise detalhada da estrutura partindo de uma inspeção visual já realizada, na qual foi possível se ter um rápido conhecimento da estrutura e se obter um pré-diagnóstico. Foram então definidos os ensaios e principalmente os pontos onde foram realizados os ensaios para que fosse feito um diagnóstico adequado da estrutura.

Quanto aos ensaios, o de caracterização da profundidade de carbonatação demonstrou de forma nítida os efeitos do processo de corrosão que está ocorrendo nas coberturas. Os resultados obtidos com este ensaio mostraram de maneira clara o avanço da frente de carbonatação que ocorre ao longo da estrutura. Durante a realização do ensaio foram observadas também as diferenças de cobrimento devido a prováveis descuidos durante a execução. Estes dois fatores foram de modo geral podem ser os responsáveis pelos pontos em que a corrosão da armadura já se encontrava em estágios mais avançados.

No ensaio de caracterização da profundidade carbonatada foi possível avaliar precisamente até que ponto o concreto se encontrava despassivado, deixando assim desprotegida quimicamente a armadura e acelerando o processo corrosivo. Em alguns pontos do ensaio foi observado que a armadura já se encontra com o pH abaixo do indicado e pode estar oferecendo riscos futuros à segurança estrutural da peça se esta não tiver um devido acompanhamento.

Os ensaios colorimétricos e os de análise química foram utilizados em conjunto para avaliar a presença de íons cloreto livres no concreto. Ambos os ensaios indicaram uma presença extremamente baixa de íons cloreto, sendo que a medida fornecida pela análise química foi mais precisa e indicava resultados menores que 0,05 % de cloretos sobre a massa de concreto. Estes resultados associados aos resultados do ensaio de carbonatação indicam que a corrosão que está ocorrendo na estrutura de concreto armado é do tipo corrosão generalizada.

No ensaio de potencial de corrosão foi possível verificar as probabilidades das coberturas estarem corroídas ou não. Este ensaio apresentou no início diversas dificuldades para realizar as medições e os valores aparentemente desconexos com a Norma ASTM C87609 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009), norma de referência para este ensaio, dificultando em parte a realização do ensaio. Tentou-se realizar as medições com outro aparelho, o GECOR, porém sem apresentar resultados conclusivos.

As coberturas são alguns dos pontos que mais estão suscetíveis à corrosão por estarem expostas ao ambiente externo (ciclos de molhagem e secagem, chuva, vento) o tempo todo, o que as deixam muito propensas à iniciação do processo corrosivo mais rápido e a variáveis como variações térmicas e exposição solar. Após a análise dos resultados dos ensaios e da revisão da bibliografia foi possível verificar a influência do ambiente no que diz respeito a carbonatação, e que outros fatores também tiveram grande influência como: a execução da cobertura e a manutenção do cobrimento, a concepção do projeto da estrutura que dificultou a parte de execução e a qualidade do concreto. Qualidade esta que foi permitida avaliar através do potencial de corrosão e através da espessura carbonatada.

No presente momento se julga necessária uma intervenção intermediária na qual seriam restaurados os cobrimentos mínimos nas estruturas através do processo de limpeza das armaduras e reposição do cobrimento através da aplicação de argamassa de alta resistência. É de extrema importância que se mantenha também um acompanhamento periódico dos pontos

para avaliar se houve uma aceleração do processo corrosivo, devido a estas áreas apresentarem já terem apresentado expulsão do cobrimento.

Por fim, tem-se como sugestão de continuação deste trabalho a verificação da qualidade do concreto aplicado nas coberturas através de ensaios como ultrassom e esclerometria além de repensar uma forma de projeto mais adequado às coberturas que possa evitar com que ocorram mais erros durante a etapa de execução.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876 – 09**: standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken, Pennsylvania, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 9917**: agregados para concreto – determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2009.
- BERTOLINI, L. **Materiais de construção**: patologia, reabilitação, prevenção. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- BROOMFIELD, J. P. Corrosion of steel in concrete. In: REVIE, R. W. (Ed.). **Uhlig's corrosion handbook**. 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. p. 633-648.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1998. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.
- ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **UNI 7928**: determinazione della penetrabilità dello ione cloruro. Milano, 1978
- FERNANDES, M. A. **Comportamento do N inorgânico dissolvido em águas superficiais e sub-superficiais em área com cultivo de cana-de-açúcar**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- GOOGLE MAPS [Campus do Vale UFRGS]. [S. l.], c2013a.
- GOOGLE MAPS [Campus do Vale UFRGS Leme]. [S. l.], c2013b.
- GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.
- PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais utilizado pelo homem. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, v. 1, n. 53, p. 14, 2009.
Disponível em:
<http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em: 29 out. 2012.

REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**. Bagneux, França, v. 21, n. 26, p. 453-455, Nov. 1988.

RINCÓN, O. T. de; CARRUYO, A. R. de; ANDRADE, C.; HELENE, P.; DÍAZ, I. (Ed.). **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado**. 4ta. ed. Rio de Janeiro: CYTED, 2006

SOUZA, V. C. M. de; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

STANISH, K.; HOOTON, R. D.; PANTAZOPOLOU, S. J. Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete. **ACI Structural Journal**. Farmington Hills, USA, v. 96, n. 6, p. 915-921, Nov. 1999.

STANISH, K.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review**. Toronto: University of Toronto, [1997]

TORRES, A. da S. **Avaliação da sensibilidade do CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão em armaduras de concreto armado**. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.